UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

SYSTÈME DE MESURE DE LA TEMPÉRATURE D'UN PROCESSEUR EN TEMPS RÉEL PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

SAMI RIAHI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE ET GÉNIE LOGICIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INFORMATIQUE)
DÉCEMBRE 2014

© Sami Riahi, 2014.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

SYSTÈME DE MESURE DE LA TEMPÉRATURE D'UN PROCESSEUR EN TEMPS RÉEL PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE

présenté par : RIAHI Sami
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. ADAMS Bram, Doct., président
M. BELTRAME Giovanni, Ph.D., membre et directeur de recherche
M. BOIS Guy, Ph.D., membre

A mes très chers parents

Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, à votre patience et à vos innombrables sacrifices.

Que ce modeste travail, soit pour vous une petite compensation et reconnaissance envers ce que vous avez fait d'incroyable pour moi.

Qu'Allah, le tout puissant, vous préserve et vous procure sante et longue vie afin que je puisse a mon tour vous combler.

A mes très chers sœurs et frères

Aucune dédicace ne serait exprimer assez profondément ce que je ressens envers vous. Je vous dirais tout simplement, un grand merci, je vous aime.

A mes très chers amis

En témoignage de l'amitié sincère qui nous a liée et des bons moments passés ensemble, je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux et plein de bonnes promesses

. . .

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, Giovanni Beltrame, pour son support, ses directives et pour m'avoir initié à la recherche.

J'aimerais aussi remercier tous ceux qui m'ont soutenu de prés ou de loin, notamment, mes collègues du laboratoire MIST pour l'ambiance de travail et mes amis de l'école Polytechnique et de partout du Montréal avec qui j'ai partagé de bons moments.

Finalement, sans citer les noms parce qu'ils sont nombreux, j'aimerais remercier ceux qui ont été toujours à mes cotés dans les moments les plus difficiles.

RÉSUMÉ

L'analyse thermique de tout composant électronique est souvent limitée par l'incapacité d'obtention de données de température précises et détaillées. Ainsi la validation des modèles thermiques élaborés pour décrire le comportement des microprocesseurs se fait soit par simulation sans la mesure en temps réel des réponses de chaque composant soit via l'utilisation des thermocouples comme méthode de collecte de données dans des zones spécifiques de la puce. Les deux méthodes présentent certaines lacunes : La simulation est fondée sur des modèles imparfaits tandis que la collecte des données ne peut pas donner des valeurs précises de la température.

Pour résoudre ce problème, la mise en place d'une nouvelle méthodologie de validation de modèle de simulation a fait l'objet de ce travail. Cette méthodologie consiste à l'utilisation de la thermographie IR pour la capture de la distribution de la température et la dissipation de la puissance d'une puce en temps réel. L'installation d'un tel système de mesure nécessite le remplacement du système de refroidissement installé sur le processeur par un autre système permettant le passage des radiations IR qui seront détectées par la caméra infrarouge. Pour ce faire, nous avons eu recours à deux solutions, l'utilisation de l'huile minérale et le module à effet de Peltier. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la deuxième solution proposée qui a permis un meilleur contrôle et une stabilisation de la température. Les résultats montrent que les deux ICTherm et Comsol fournissent des valeurs de température qui se trouvent dans la précision de la caméra infrarouge utilisé dans cette étude ($\pm 2\,^{\circ}\mathrm{C}$).

ABSTRACT

The thermal analysis of any electronic component is often limited by the inability to obtain detailed and accurate temperature data. To validate any thermal model developed to describe the behavior of microprocessors, two methods are currently used. One technique simulates the thermal response of each component given a certain input, the other uses thermocouples as a method of data collection in specific chip areas. Both methods have various shortcomings: simulation relies on imperfect models, while data collection cannot provide fine-grained temperature values.

To solve this problem, we investigated the establishment of a new methodology to validate a thermal simulation model. It involves the use of infrared thermography to capture the distribution of temperature and the power dissipation of a chip in real time.

The installation of such a measurement system requires the replacement of the cooling system installed on the processor by another system which enables the passage of IR radiation to be detected by the camera. Two solutions were proposed, the use of mineral oil and a thermoelectric cooler (a Peltier module). The best results were obtained with the latter, allowing better control and temperature stabilization. The data collected by our system were then used to validate the accuracy of the thermal of two thermal models, Comsol and ICTherm.

Results show that both ICTherm and Comsol provide temperature values that are within the accuracy of the infrared camera used in this study, i.e. $\pm 2\,^{\circ}\mathrm{C}$.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vi

TABLE DES MATIÈRES vii

LISTE DES TABLEAUX ix

LISTE DES FIGURES x

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1
1.1 Problématique 1
1.2 Objectif 2
1.3 Hypothèses 3
1.4 Méthodologie 3
1.5 Contributions 3
1.5.1 Biens livrables 3
1.5.2 Impacts de la recherche 4

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 5
2.1 Problèmes thermiques dans les circuits intégrés 5
2.2 Système de mesure de la température 7
2.2.1 Capteurs sur puce 7
2.2.2 Thermographie infrarouge 8
2.3 Systèmes de refroidissement 11
2.3.1 À l'huile 11
2.3.2 Par effet de Peltier 12
2.4 Simulation et validation d'un modèle thermique 12

CHAPITRE 3 PLATE-FORME DE MESURE PROPOSÉE 14
3.1 Composition du premier système de mesure proposé 14

3.2 Systèmes de refroidissement testés 16
3.2.1 Refroidissement à l'huile 17
3.2.2 les installations qui ont échoué 21
3.2.3 Refroidissement avec l'effet de Peltier 23
3.3 Composition du système de mesure retenu 27
3.4 Extraction les données thermiques 30

CHAPITRE 4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX 33
4.1 Description du système étudié 33
4.1.1 Composition du système étudié 33
4.1.2 Conditions aux limites 34
4.1.3 Réalisation du modèle 35
4.2 Validation du modèle thermique au régime permanent 37
4.2.1 Comparaison à 100% de la charge du processeur 39
4.2.2 Comparaison à 60% de la charge du processeur 41

CHAPITRE 5 CONCLUSION 44
5.1 Synthèse des travaux 44
5.2 Limitations de la solution proposée 45
5.2.1 Limitations matérielles 45
5.2.2 Limitation logicielle 46
5.3 Améliorations futures 46

RÉFÉRENCES 47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Caractéristiques du processeur Athlon 15
Tableau 3.2 Données numériques pour le système de mesure 19
Tableau 3.3 Résultats numériques : 19
Tableau 3.4 Caractéristique de la micro pompe 20
Tableau 3.5 Caractéristiques de la pompe à huile 23
Tableau 3.6 Caractéristiques du processeur Atom 28
Tableau 4.1 Éléments du système étudié 34
Tableau 4.2 Comparaison des résultats à 100% de puissance 40
Tableau 4.3 Comparaison des résultats à 60% de puissance 43

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Évolution de la fréquence d'horloge des microprocesseurs Intel au cours du temps . . . 6
Figure 2.2 Évolution de la densité de puissance des microprocesseurs Intel au cours du temps[25] . . . 7
Figure 2.3 Transmission atmosphérique à 15.5 °C, 70 % d'humidité relative et au niveau de la mer . . . 9
Figure 2.4 principe du refroidissement à l'huile [13] . . . 11
Figure 2.5 système avec une plaque en saphir [1] . . . 11
Figure 3.1 Système de mesure avec le dispositif de refroidissement à l'huile . . . 14
Figure 3.2 caméra infrarouge FLIR A40 . . . 15
Figure 3.3 Microprocesseur AMD Athlon 64 avec son dissipateur . . . 15
Figure 3.4 Microprocesseur AMD Athlon 64 sans dissipateur . . . 15
Figure 3.5 Carte mère Tyan Tomcat K8E . . . 16
Figure 3.6 Première pompe à huile (500 L/h) . . . 20
Figure 3.7 Radiateur avec son ventilateur . . . 20
Figure 3.8 water bloc conçu avec l'outil du CAO CATIA V5 . . . 21
Figure 3.9 Système de mesure avec le dispositif de refroidissement à l'huile . . . 22
Figure 3.10 Deuxième pompe à huile (2400 L/h) . . . 23
Figure 3.11 Nouveau dispositif de refroidissement «module de Peltier» . . . 24
Figure 3.12 Module de Peltier [2] . . . 25
Figure 3.13 Abaque de puissance / tension d'un module de Peltier . . . 26
Figure 3.14 Refroidisseur . . . 27
Figure 3.15 carte mère Intel D2700DC . . . 27
Figure 3.16 Système de mesure avec le nouveau dispositif de refroidissement «module de Peltier» . . . 28
Figure 3.17 Logiciel ThermaCam Reasercher pour acquerir les données . . . 29
Figure 3.18 région de transparence du silicium . . . 29
Figure 3.19 Logiciel Flir Tools pour analyser les données . . . 30
Figure 3.20 Implémentation d'un script de conversion . . . 32
Figure 4.1 Floorplan de l'Atom D2700 . . . 33
Figure 4.2 Modèle thermique du système proposé avec conditions aux limites . . . 35
Figure 4.3 Instanciation d'un bloc sous ICTherm . . . 36
Figure 4.4 Maillage orthogonal de ICTherm . . . 36

Figure 4.5 Maillage tétraédrique de Comsol 37
Figure 4.6 Valeurs de la température relevées par les capteurs 37
Figure 4.7 L'algorithme du programme de comparaison des résultats 38
Figure 4.8 Image prise par la caméra infrarouge à 100% de puissance 39
Figure 4.9 Simulation du modelé avec Comsol à 100% de puissance 39
Figure 4.10 Localisation du point le plus chaud 40
Figure 4.11 Moyenne des températures (min, max et moyenne) obtenues par Thermographie IR et avec les deux modèles 41
Figure 4.12 Image prise par la caméra infrarouge 42
Figure 4.13 Simulation du modèle avec Comsol 42
Figure 4.14 Localisation du point le plus chaud 42
Figure 4.15 Moyenne des températures (min, max et moyenne) obtenues par Thermographie IR et avec les deux modèles 43

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La puissance consommée par les processeurs multicœurs, due à l'augmentation des nombres de cœurs et de la fréquence de chaque processeur, est dissipée sous forme de chaleur ce qui provoque des problèmes thermiques comme la distribution inégale de la température qui est un défi pour les concepteurs de puces [13]. Plus précisément, il serait idéal si les statistiques réelles de consommation d'énergie et de température pourraient être recueillies pour chaque grand bloc processeur de floorplan (cache L1, registre des fichiers...). La dissipation de la puissance accrue et une plus grande variation de température mettent en évidence la nécessité d'une analyse thermique des composants électroniques. Sans prédiction précise du profil de température, il est impossible de déterminer correctement les caractéristiques des composants électriques. Et par conséquent, ils peuvent être à risque de surchauffer et de provoquer une panne composante précoce. Si l'on est capable d'estimer combien de chaleur sera produite, on pourra changer le comportement de la puce pour éviter un dysfonctionnement du circuit et par conséquent augmenter la durée de vie des systèmes informatiques.

1.1 Problématique

La clé de l'analyse thermique efficace est la capacité d'obtenir des données de température précises et détaillées sous les conditions de fonctionnement réelles. Cependant, la méthode la plus courante de collecte de ces données de température est l'utilisation des thermocouples [7], malgré le fait qu'elle soit limitée par le grand nombre des points à surveiller et par les petites dimensions des éléments à tester. Pour valider les modèles de puissance d'un processeur, la communauté d'architectes voudrait observer le comportement réel de la température et de la puissance des systèmes à hautes performances proposés. Sans la mesure des réponses en temps réel du processeur, les meilleurs efforts de la communauté sont réduits à la réalisation des simulations en utilisant des outils de modélisation thermique. Notre travail consiste à établir un système de mesure par thermographie infrarouge qui va servir à capter la distribution de la température et la dissipation de la puissance d'une puce sous test. L'acquisition de la température se fera par le biais d'une caméra infrarouge qui va nous fournir des cartes thermiques détaillées du modèle à étudier. Ceci devra être accompli sans le besoin d'entrer en contact avec les composants. Vu que nous avons besoin de lire la température sur le processeur et que ce dernier est inaccessible par la caméra infrarouge sous le système de refroidissement

à l'air constitué principalement d'un dissipateur en métal qui masque le processeur, nous devons enlever le système de refroidissement utilisé et permettre ainsi le passage des radiations infrarouges qui seront détectées par notre caméra. Dans ce cas, et pour remplacer le système de refroidissement à l'air, nous sommes dans l'obligation de trouver un autre moyen. Une recherche bibliographique nous a permis d'identifier quelques solutions et nous avons essayé avec les plus utilisées qui sont le refroidissement avec l'huile minérale et le refroidissement avec le module à effet de Peltier qui répondent bien à nos besoins spécifiques. Dans notre premier plan, nous avons essayé avec le refroidissement à l'huile minérale, mais les résultats des premiers tests que nous avons effectués ont échoué vu que nous n'avons pas réussi à stabiliser la température du microprocesseur. Ceci nous a conduits à choisir le module à effet de Peltier comme la meilleure solution qui nous convient puisqu'elle nous a permis de contrôler la température avec la précision requise pour dissiper la quantité de chaleur du microprocesseur. Ce système de refroidissement permettra à la caméra infrarouge de mesurer la température sans obstacle. De même, une étude dimensionnelle nous fournira comme résultat les paramètres exacts pour pouvoir dissiper la même quantité de chaleur que le ventilateur. Dans le même contexte, nous allons prélever des mesures de la température de différents benchmarks sous le système de refroidissement à l'air et sous le système de refroidissement avec la cellule à effet Peltier pour valider l'efficacité de notre nouveau système. Les données recueillies par notre système peuvent être utilisées pour valider l'exactitude des performances de nombreux modèles thermiques validés normalement par des modèles de simulation et c'est une autre façon de lier la simulation aux mesures réelles. En outre, les performances thermiques du microprocesseur vont être simulées par deux modèles thermiques qui sont Comsol et ICTherm. Les résultats obtenus en utilisant les efforts de simulation seront comparés aux résultats expérimentaux obtenus par thermographie infrarouge afin de les valider.

1.2 Objectif

L'objectif général est de valider un modèle de simulation pour permettre l'analyse thermique sans le trouble de faire des mesures. Pour ce faire, nous avons besoin d'établir une bonne carte de température via l'utilisation de la caméra infrarouge. Les étapes de réalisation du projet sont trois :

1. Réaliser le système de mesure par la caméra infrarouge et acquérir les valeurs de la température
2. Validation des mesures réelles et comparaison avec les valeurs prises par le capteur
3. Validation du modèle thermique et comparaison entre les mesures réelles, ICTherm et Comsol

1.3 Hypothèses

L'hypothèse principale de notre recherche est la suivante : il y a un lien direct entre la température, la puissance dissipée et l'activité de la puce. Utiliser la thermographie infrarouge pour réaliser des mesures thermiques sur un microprocesseur en fonctionnement nous permettra d'obtenir une bonne carte thermique fidèle aux résultats obtenus avec les capteurs embarqués sur la puce. Ainsi, le modèle de la simulation peut être adapté aux résultats expérimentaux.

1.4 Méthodologie

Pour étudier le comportement thermique de notre microprocesseur, nous allons proposer une méthode d'analyse qui comporte deux étapes :

— Comparer les résultats recueillis à partir du capteur thermique sous les deux méthodes de refroidissement qui sont le refroidissement à l'air et le refroidissement avec la cellule à effet Peltier.

— Comparer les résultats recueillis à partir du capteur thermique et de la caméra infrarouge sous le refroidissement avec la cellule à effet Peltier sous différentes charges de travail.

Par la comparaison des résultats recueillis avec le capteur thermique sous les différents types de refroidissement, nous pouvons valider l'efficacité de notre système avec la cellule à effet Peltier et déterminer la différence de température si elle existe. Dans ce cas, nous serons dans l'obligation d'ajuster les paramètres de la cellule pour avoir des valeurs de la température similaires à celles en utilisant le refroidissement à l'air. Dans une seconde étape, nous allons comparer les résultats recueillis à partir du capteur thermique et ceux recueillis à partir de la caméra infrarouge sous différentes charges de travail pour avoir une analyse complète du comportement thermique du microprocesseur et pouvoir déterminer l'erreur qui peut être causée par le changement du système de refroidissement.

1.5 Contributions

1.5.1 Biens livrables

À la fin de ce projet, un système de mesure de la température et de la puissance d'un processeur sera fonctionnel. Ce système doit nous fournir les résultats requis pour l'analyse et la comparaison avec les résultats de la simulation. Un poster a été présenté lors de l'École d'hiver Francophone sur les Technologies de Conception des Systèmes embarqués Hétérogènes FETCH 2014.

1.5.2 Impacts de la recherche

Le projet décrit dans ce document présente des avancées majeures dans le domaine de la fabrication des composants électroniques et principalement les processeurs. L'impact principal de notre projet est :

- La mise au point d'une méthodologie de validation des modèles thermiques qui leur donne une précision de plus ou moins 2 degrés Celsius qui est la précision offerte par la caméra infrarouge. De point de vue commercial, la validation d'un modèle thermique sous brevet avec des mesures réelles augmente beaucoup sa valeur.
- La modélisation du microprocesseur Atom D2700 en tenant compte de sa forme géométrique, ses caractéristiques thermiques, ainsi que sa composition en matériaux.
- La mise au point d'un système de refroidissement, module à effet de Peltier, qui favorise la thermographie infrarouge sans l'inconvénient de l'huile minérale.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante : dans le chapitre 2, nous discutons la revue de littérature en liaison avec mon sujet de recherche. Ensuite, dans le chapitre 3 plateforme de mesure proposée, nous présentons notre système de mesure de la température et les étapes que nous avons réalisées pour le faire fonctionner. Nous prendrons aussi en considération les étapes qui ont échoué pendant toutes les étapes de la réalisation. De même, nous allons faire des mesures de la température sous les deux types de refroidissement avec le capteur thermique ainsi que des mesures réelles avec la caméra infrarouge. Dans le chapitre 4, nous allons modéliser le système étudié et l'implémenter avec deux modèles de simulation thermiques, ICTherm et Comsol. Les résultats obtenus seront comparés avec les mesures réelles dans l'étape de validation.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Durant son fonctionnement, un microprocesseur consomme de la puissance électrique. Elle sera dissipée sous forme de chaleur par effet joule [14] ce qui est à l'origine de la limitation des performances du microprocesseur ainsi que la diminution de sa durée de vie. De plus, les circuits intégrés modernes, due à la concentration des transistors dans un espace très réduit, induisent une densité de puissance très élevée [8]. La mesure de la température d'un processeur en temps réel par thermographie infrarouge est devenue une méthode très utilisée pour valider les modèles thermiques de simulation qui nous permettent d'explorer l'espace de conception des circuits électroniques sans avoir besoin de toucher aux matériels. L'utilisation d'un système de mesure par thermographie infrarouge est une étape nécessaire pour la création des modèles de simulation des circuits intégrés [8].

2.1 Problèmes thermiques dans les circuits intégrés

Depuis la construction du premier transistor CMOS, considéré comme l'élément fondamental des circuits intégrés grâce à sa simplicité de fabrication et sa consommation extrêmement réduite, le domaine de la microélectronique a connu une évolution considérable durant ces trente dernières années. Les premiers processeurs réalisés avec cette technologie ont connu une faible consommation de puissance. C'est en 1970 que Gordon Moore, l'un des fondateurs d'Intel, a fait une prédiction à partir d'une simple observation, connu plus tard par la « loi de Moore », pour dire que le nombre de transistors intégrés sur une puce de même surface doublera tous les deux ans [18]. À partir de cette observation, il en avait déduit que cette évolution continuera tant que les limites physiques ne seront pas atteintes. En réduisant constamment la longueur de la grille, les circuits intégrés ont connu un gain de point de vue de la réduction de la surface d'intégration à puissance égale et de point de vue des performances puisque la longueur de la grille est inversement proportionnelle à la fréquence de fonctionnement des processeurs.

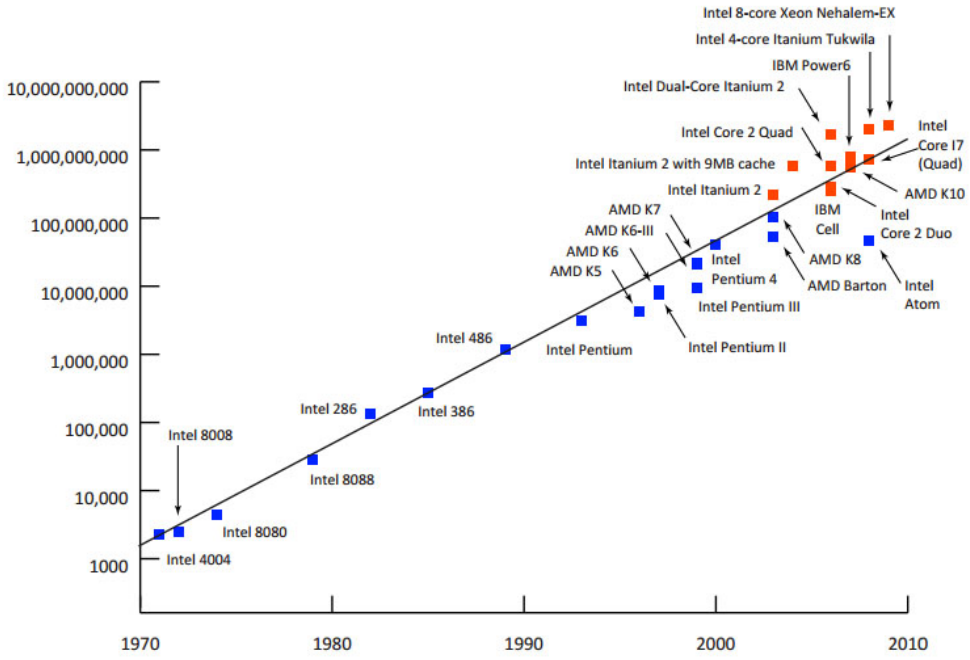

Figure 2.1: Évolution de la fréquence d'horloge des microprocesseurs Intel au cours du temps

Puisque la longueur de la grille a été réduite et que l'épaisseur d'oxyde est voisine de quelques nanomètres, les concepteurs ont abandonné la tension d'alimentation de 5V pour des tensions plus basses pour ne pas atteindre un champ électrique critique [15]. Cette réduction semble être profitable pour aboutir à une diminution de la puissance de consommation. Pour les circuits intégrés numériques, la puissance dissipée est une puissance dynamique en raison des fréquences de fonctionnement élevées, c'est la puissance consommée pendant les charges et décharges des capacités dans les circuits intégrés. Cette réduction a pour effet de créer un courant de fuite et d'augmenter la température des jonctions ainsi que la puissance statique dans les transistors. Suite au passage du courant dans les connexions d'un transistor, la consommation de la puissance électrique augmente dont une quantité considérable sera dissipée sous forme de chaleur dans le circuit intégré. En réponse à cette perte de chaleur par effet joule, les concepteurs se sont confrontés aux problèmes de la dissipation thermique qui entraîne une élévation de la température influençant le fonctionnement du circuit et qui diminue sa durée de vie [27]. Les problèmes thermiques sont de plus en plus importants pour les circuits intégrés de hautes gammes. La situation est de plus en plus critique pour les microprocesseurs où les performances sont de plus en plus limitées par la puissance maximale pouvant être dissipée sans dépasser la température de jonction maximale.

Les circuits intégrés modernes comportent des centaines de millions de transistors sur une surface réduite et qui dissipent une grande chaleur d'où une densité de puissance très élevée. La figure 2.2 montre les tendances de la densité de puissance des microprocesseurs Intel. Il a montré que cette densité de puissance a dépassé celle d'une plaque chauffante d'une cuisine ordinaire. Si cette tendance se poursuit, il ne sera pas long avant que les microprocesseurs aient des densités de puissance comparable à celle des réacteurs nucléaires et des tuyères de fusée [25].

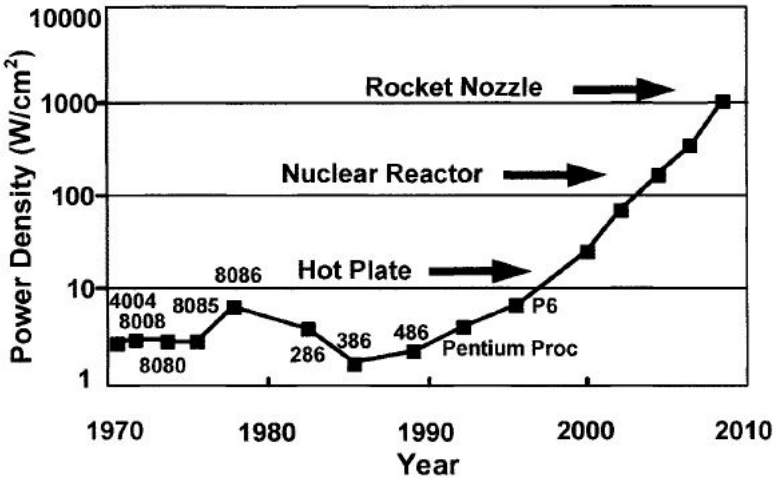

Figure 2.2: Évolution de la densité de puissance des microprocesseurs Intel au cours du temps[25]

2.2 Système de mesure de la température

Pour valider les modèles thermiques avec la précision souhaitée, une méthode de mesure robuste et précise s'avère nécessaire. Plusieurs chercheurs [1], [4], [13] ont proposé des méthodes expérimentales permettant la mesure de la température sur des microprocesseurs en temps réel.

2.2.1 Capteurs sur puce

Dans de nombreux dispositifs à semi-conducteurs modernes, tels que les processeurs, on remarque différentes localisations de la température. Ceci est dû aux différents niveaux d'activités sur la puce et aux alentours de ces localisations. Ainsi, le contrôle thermique en continu sur la puce par des capteurs de température est utilisé pour réduire le risque d'endommagement thermique et augmenter la fiabilité des dispositifs semi-conducteurs. Divers

circuits de capteur ont été utilisés auparavant. Certains modèles ont utilisé une différence entre les tensions (base / émetteur) d'un transistor PNP à substrat, diodes thermiques, qui sont des structures simples et faciles à intégrer dans n'importe quel placement de puce [17]. Cependant, ces capteurs consomment de l'énergie. Dans certains cas, les signaux émis par ces derniers doivent être amplifiés avant d'être traités en utilisant, par exemple, un convertisseur analogique numérique (ADC). Ces types de capteurs ont tendance à consommer plus de puissance et de l'espace d'un microprocesseur. De même, les diodes thermiques souffrent de la non-linéarité et peuvent être soumises à des effets environnementaux. L'utilisation de capteurs numériques sur microprocesseurs est de plus en plus populaire. Ils restent la méthode préférée pour lire la température de la puce spécialement quand ils sont très proches de la source de chaleur. Ils donnent ainsi un traçage plus précis du comportement thermique du microprocesseur. Les capteurs numériques consomment des ressources non négligeables [11]. Leur mise en place dans une configuration de processeur optimisé par un espace très limité devient compliquée lorsque le nombre de capteurs augmente [5]. Étant donné que l'emplacement des capteurs est de nature discrète, la localisation de tous les points chauds de la puce est devenue impossible ce qui conduit à un gradient d'erreur géométrique si notre capteur n'est pas dans la position exacte que le point chaud à détecter. D'où, la limitation de cette solution si on veut l'utiliser pour la validation des modèles thermiques.

2.2.2 Thermographie infrarouge

1. Principe :
   Tout corps dont la température est supérieure à zéro absolue (0 Kelvin) émet un rayonnement électromagnétique. Cette émission est due à l'agitation des atomes qui rayonnent de l'énergie. Plus la température augmente, plus l'agitation augmente et le rayonnement émis devient visible lorsque sa longueur d'onde correspond à celle de la couleur Rouge ($1\mu m$) [12]. Si la température augmente encore la « couleur apparente » du corps passe à l'orange puis au jaune et enfin au blanc. La thermographie est la technique permettant d'obtenir, au moyen d'un appareillage approprié, l'image thermique d'une scène observée dans un domaine spectral de l'infrarouge. L'instrument de mesure infrarouge détecte les radiations émises par un objet et les convertit en un signal électrique [29].
2. Types de caméra :
   Le spectre électromagnétique est divisé en plusieurs régions ou bandes en fonction de la longueur d'onde. L'infrarouge est une onde électromagnétique de fréquence inférieure à celle de la lumière rouge. La longueur d'onde de l'infrarouge est comprise entre $0.8\mu m$ et $1000\mu m$. Une grande partie de la gamme infrarouge du spectre électro-

magnétique N'est pas utile dans la thermographie infrarouge parce qu'elle est bloquée par l'atmosphère. Les parties suivantes définissent la région utile de l'infrarouge :

— L'infrarouge proche (Near-infrared « NIR ») : de $0.8\mu m$ à $1.7\mu m$
— L'infrarouge à ondes courte (Short-wavelength infrared «SWIR») : de $1\mu m$ à $2.5\mu m$
— L'infrarouge à ondes moyennes (Mid-wavelength infrared « MWIR ») : de $2\mu m$ à $5\mu m$
— L'infrarouge à ondes longues (Long-wavelength infrared « LWIR ») : de $8\mu m$ à $14\mu m$

De toutes ces régions, l'infrarouge à ondes moyennes « MWIR » et l'infrarouge à ondes longues « LWIR » sont les plus couramment utilisées et ce pour deux raisons [24]. La première raison est due à la relation entre la température et la longueur d'onde. La mesure la plus efficace pour une température particulière doit être effectuée pour la longueur d'onde à laquelle la plupart des radiations est émises (figure 2.3). La deuxième raison est liée à la transmission atmosphérique. En traversant l'air, le rayonnement infrarouge est absorbé par des différentes particules d'air, la plupart du temps par le CO2 et le H2O. Le degré auquel l'air absorbe le rayonnement infrarouge dépend de la longueur d'onde [26].

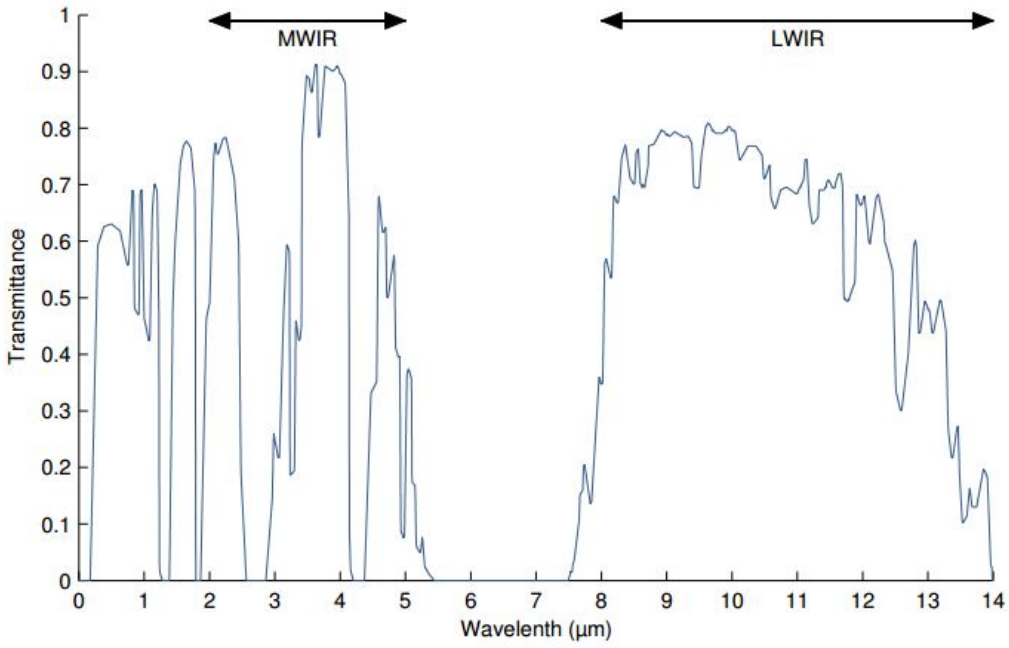

Figure 2.3: Transmission atmosphérique à 15.5 °C, 70 % d'humidité relative et au niveau de la mer

Dans les bandes « MWIR » et « LWIR », cette absorption est faible, ce qui permet à une plus grande quantité de rayonnement d'atteindre le capteur de la caméra infrarouge. Pour chacune des deux bandes, nous allons présenter une camera infrarouge avec ses spécifications techniques.

- FLIR SC 5000 « MWIR » : propose une résolution spatiale élevée pour une sensibilité et précision d'excellence. Leur matrice à plan focal (FPA) de 320 x 240 pixels ou 640 x 512 pixels offre une exceptionnelle vitesse d'images par seconde de 100 ou 380 Hz tout en conservant une linéarité et une sensibilité extraordinaires. Elle offre une gamme spectrale de 2.5 à 5 micromètres, conçues pour les utilisateurs les plus exigeants de la technologie infrarouge qui souhaitent obtenir une imagerie thermique à haute résolution spatiale.
- FLIR A40 « LWIR » : offre une gamme spectrale de 7.5 à 13 micromètres avec une fréquence de 60Hz et une résolution d'image de 320 x 240 pixels. Elle offre aussi une précision de $\pm 2\,^{\circ}\mathrm{C}$.

3. Mesure de la température des processeurs :

   Parmi les méthodes expérimentales de mesure de la température [1], [4], [13], [14] proposent un système de mesure en utilisant une caméra infrarouge. Ardestani et coll. [1] ainsi que Mes-Martinez et coll. [14] donnent une description de composantes matérielles et décrivent les avantages que portent cette solution pour valider les modèles thermiques. Après avoir observé le profil de la température du microprocesseur en cours de fonctionnement, ils ont proposé des améliorations aux infrastructures de simulation existantes vu que les résultats ont montré des cas où la chaleur se propage rapidement dans les blocs de floorplan avec une densité du métal élevée. D'où la nécessité d'inclure ce paramètre dans les modèles de simulation.

   Ces installations de mesure offrent des captures en temps réel de la puissance consommée, les caractéristiques thermiques et les performances des activités d'un processeur moderne. Mesa-Martinez et coll. [13] ont énuméré les étapes de la réalisation du système de mesure qui ont échoué. La mise en place d'un dissipateur de chaleur transparent aux radiations IR a constitué une difficulté parmi d'autres, rencontrées lors de l'installation d'un tel système. Ils ont donc testé un écoulement d'air avant de tester plusieurs liquides comme l'eau et l'huile d'olive. Tous ces échecs ont contribué finalement au bon fonctionnement du système de mesure et une huile minérale d'une épaisseur de 2 mm qui coule entre deux plaques en saphir était la solution à retenir (figue 2.5) . Cette partie nous a conduits vers une étude plus approfondie sur les systèmes de refroidissement que nous pouvons utiliser pour notre plate-forme de mesure
   .

2.3 Systèmes de refroidissement

2.3.1 À l'huile

Certains travaux [1], [13] proposent l'utilisation d'un système de refroidissement avec l'huile minérale transparente aux radiations infrarouges et qui fournit une excellente image thermique. L'opération consiste à créer un flot d'huile en dessus du substrat en silicone pour dégager la chaleur du microprocesseur.

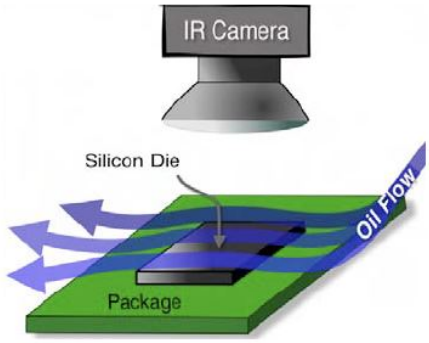

Figure 2.4: principe du refroidissement à l'huile [13]

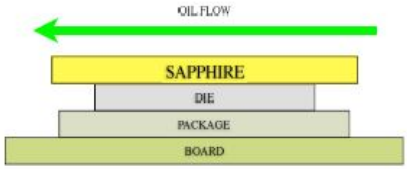

Figure 2.5: système avec une plaque en saphir [1]

Ils proposent aussi l'utilisation d'une plaque en saphir pour remplacer le dissipateur de chaleur métallique. L'emploi de cette plaque,transparente aux radiations infrarouges, avec l'huile minérale présente une nouvelle solution pour dissiper la même quantité de chaleur du microprocesseur vu que sa surface plus grande que celle du «die» offre une surface de contact plus large avec le lubrifiant.

Mesa-Martinez et coll. [13] estiment que la quantité de chaleur à dissiper peut atteindre 100 watts et leurs mesures ont montré une différence inférieure à 1 degré Celsius entre les deux côtés de la puce. Ardestani et coll. [1] propose plus de détails sur l'installation et présente la méthode avec laquelle a calculé le coefficient du transfert de la chaleur h pour pouvoir par la suite déterminer la quantité de chaleur dissipée par le processeur. Il identifie la différence entre les deux systèmes de refroidissement, celui de l'air forcé avec le dissipateur métallique et celui de l'huile minérale avec la plaque en saphir. L'absence du dissipateur et son influence sur le comportement du « die » ainsi que la direction du flot de fluide et son impact significatif sur la distribution de la température ont été aussi discutés dans ce papier. Ainsi, en régime permanent, la localisation des points chauds (connus sous le nom de hotspots) peut changer avec la direction du flot de fluide

2.3.2 Par effet de Peltier

L'un des systèmes de refroidissement étudiés dans notre projet est le module de Peltier, appelé encore refroidissement par effet de Peltier qui se produit dans des matériaux conducteurs de natures différentes liés par des jonctions. En appliquant une différence de potentiel aux deux bornes du module de Peltier, l'une des jonctions se refroidit pendant que l'autre se réchauffe [16]. Cet effet de Peltier est particulièrement fort quand un matériau est un semi-conducteur de type N et l'autre est un semi-conducteur de type P. Le mouvement de la chaleur offre une capacité de refroidissement à l'état solide qui est idéal pour les applications où la stabilisation ou le contrôle de la température sont nécessaires. En ajustant ou inversant la polarité du courant continu appliqué, le flux de chaleur peut être modifié proportionnellement permettant un contrôle précis de la température des jonctions [20].

Yamaguchi et coll. [28] prédit que les modules à effet de Peltier présentent des inconvénients majeurs les empêchant d'être fréquemment utilisés. Le premier étant une consommation importante d'énergie presque égale à celle consommée par un microprocesseur. En effet, si l'on veut refroidir un microprocesseur qui consomme 100 watts, il nous faut une consommation de 70 watts pour le module de Peltier. De plus, la consommation du microprocesseur change tout le temps en fonction des charges de travaux tandis que la consommation du module de Peltier reste constante et ainsi quand la température du microprocesseur diminue, une large différence de température sera créée ce qui peut constituer un danger pour l'ordinateur. Alors que la plupart des installations proposent des configurations du système de mesure qui sont similaires avec la caméra infrarouge et système de refroidissement à l'huile, notre travail tient en compte les mesures faites par les capteurs déjà installés sur le processeur et propose le cellule à effet de Peltier comme la solution de refroidissement permettant la dissipation de la même quantité de chaleur. Notre choix est fondé sur le fait que le module de Peltier nous épargne les inconvénients du refroidissement à l'huile et il présente certains avantages avec notre système à étudier qui n'a pas besoin d'un refroidisseur à l'air puisqu'il fonctionne à faible puissance (10W). De même, la cellule de Peltier, peu encombrante, permet un contrôle efficace de la température.

2.4 Simulation et validation d'un modèle thermique

La simulation est un outil indispensable dans la conception, l'analyse et l'évaluation des systèmes informatiques. Un simulateur doit être en mesure de refléter le comportement d'un système au cours de son analyse. Pour valider un modèle thermique, nous devons vérifier et déterminer l'exactitude de ses données empiriques. Un de ces outils est ICTherm [9], un modèle thermique utilisé pour les circuits électroniques. Il est capable de simuler le com-

portement thermique d'un 3D-IC ainsi que celui d'un circuit intégré traditionnel intégré en 3D. Pour pouvoir déterminer la température en tout point du circuit, ICTherm a besoin de connaître la structure physique du circuit ainsi que la puissance dissipée. Skadron et coll. [19] décrivent Hotspot comme un modèle assez rapide et précis basé sur un circuit de résistances et de capacités équivalent à l'architecture des différents blocs ainsi que les aspects essentiels du paquet thermique. L'utilisation de Hotspot a permis de déterminer les points les plus chauds, comprendre le rôle des différents paquets thermiques, les performances d'une architecture et comprendre le comportement thermique des programmes. Le modèle a été validé contre un simulateur par éléments finis « FloWorks », un simulateur commercial pour l'étude thermique et l'écoulement des fluides. Sridhar et coll. [21] nous proposent une approche pour la modélisation des circuits intégrés 3D. Le modèle, qualifié comme générique et flexible, peut incarner les données thermiques de n'importe quelle source et produit une analyse thermique très rapide des circuits intégrés 3D. Pour valider la précision, la rapidité et la flexibilité du modèle, ils ont comparé ses résultats avec plusieurs simulateurs commerciaux de la dynamique des fluides (CFD), à savoir, ANSYS CFX. Mesa-Martinez et coll. [14] estiment qu'un modèle thermique reste insuffisant pour avoir une évaluation thermique détaillée des architectures étudiées et ils proposent l'extension du modèle thermique avec deux autres outils, un modèle de puissance et un modèle de performance.

CHAPITRE 3

PLATE-FORME DE MESURE PROPOSÉE

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer la méthodologie adoptée pour la réalisation de notre plate-forme de mesure et de montrer les différentes étapes qui ont abouti à un système de refroidissement qui remplace le dissipateur à l'air.

3.1 Composition du premier système de mesure proposé

Le système de mesure avec lequel nous avons prévu réaliser nos mesures est composé des éléments suivants :

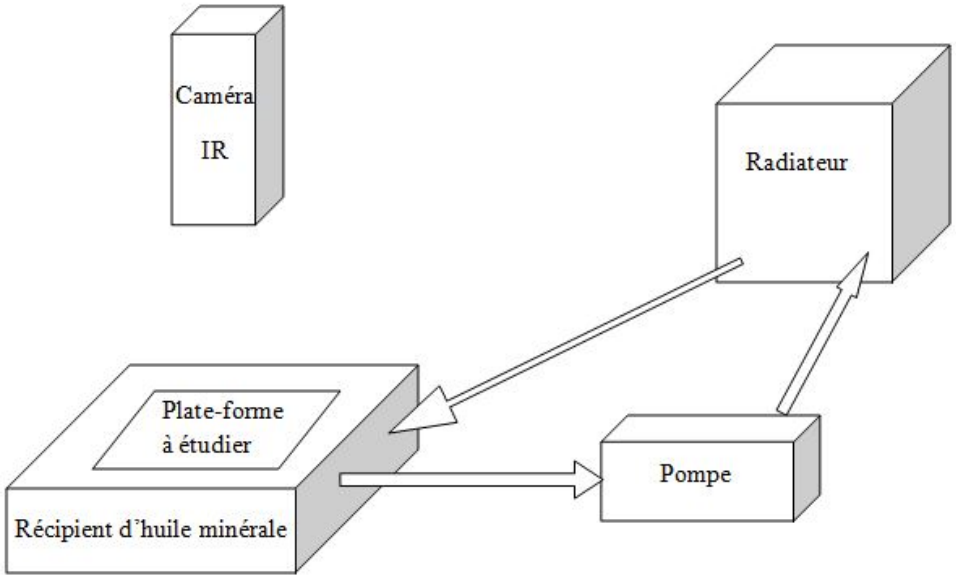

Figure 3.1: Système de mesure avec le dispositif de refroidissement à l'huile

— Une caméra infrarouge A40 offre une gamme spectrale de 7.5 à 13 micromètres avec une fréquence de 60Hz et une résolution d'image de 320 x 240 pixels. Elle offre aussi une précision de $\pm 2\,^{\circ}$C. Le logiciel pour cette caméra est une version d'essai de « ThermaCAM Researcher 2.10 pro » téléchargée à partir du site web de Flir [23]. Il est installé sur un ordinateur sur lequel nous faisons l'acquisition des cartes thermiques.

Figure 3.2: caméra infrarouge
FLIR A40

— Une carte mère Tyan Tomcat K8E Socket 939 qui contient tous les composants électroniques (carte graphique, les connecteurs, les mémoires, etc. ...) nécessaires au bon fonctionnement de notre système. Le microprocesseur installé sur notre carte mère est un Athlon 64 d'AMD.
— Un système de refroidissement à l'huile minérale composé d'une pompe hydraulique, un radiateur avec son ventilateur et un bain d'huile.

Figure 3.3: Microprocesseur AMD Athlon 64 avec son dissipateur

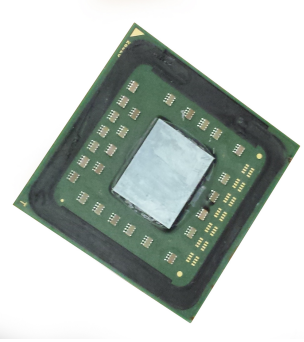

Figure 3.4: Microprocesseur AMD Athlon 64 sans dissipateur

Tableau 3.1: Caractéristiques du processeur Athlon

paramètre	valeur	paramètre	valeur
CPU	AMD Athlon 64	Package	939
Modèle de CPU	ADA3500DAA4BW	Vdd	1.35V / 1.4V
Technologie	90 nm	TDP	67 W
Fréquence	2.2 GHz	Nombre de cœurs	1

La carte mère Tyan Tomcat K8E avec ses périphériques d'entrée / sortie nous a servis comme un support idéal à notre microprocesseur AMD Athlon 64 vu qu'elle contenait tous les éléments essentiels pour l'installation de notre système comme les mémoires, la carte graphique, la carte réseau, les ports USB, etc. Ainsi, un système d'exploitation Ubuntu 12.04, une distribution Linux, est installé sur notre carte mère. Lors des mesures expérimentales, nous avons utilisé le benchmark Parboil [22] qui est un banc d'essai qui contient un ensemble d'applications pour exploiter le microprocesseur à différents niveaux de charge et par conséquent provoquer une élévation de température au cours de son fonctionnement.

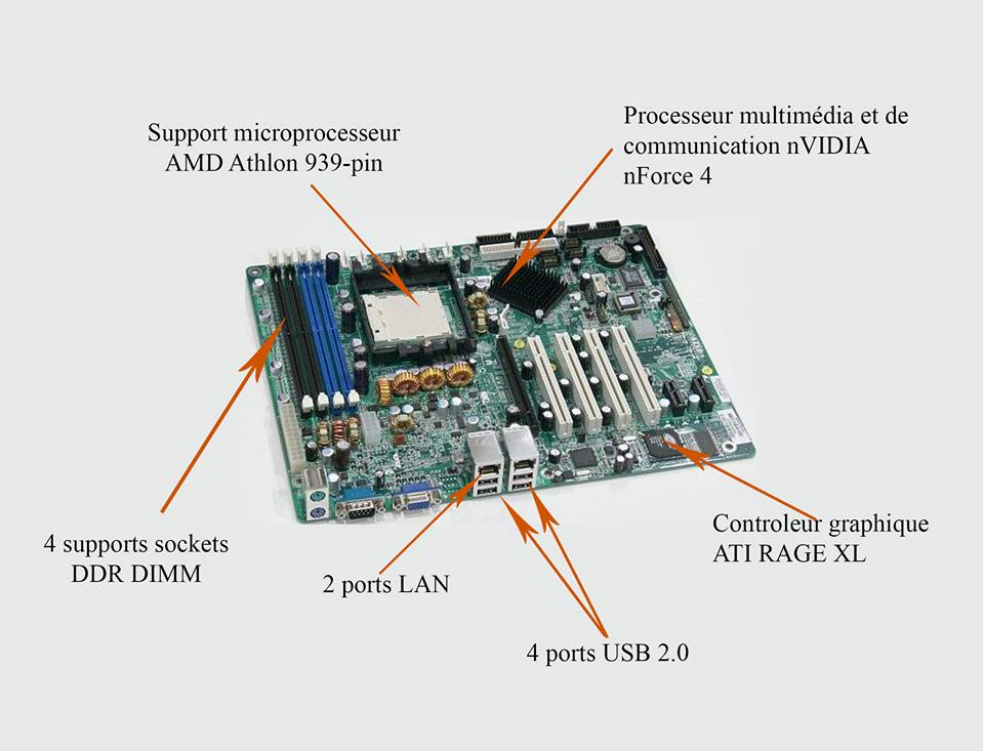

Figure 3.5: Carte mère Tyan Tomcat K8E

3.2 Systèmes de refroidissement testés

Les mesures faites par thermographie infrarouge nécessitent un système de refroidissement particulier qui dissipe la même quantité de chaleur qu'un système de refroidissement à l'air et qui permet surtout le passage des radiations infrarouges à notre caméra. D'où la nécessité de remplacer le ventilateur par un autre mécanisme convenable. Au cours de notre recherche, notre installation de système de refroidissement a progressé, ainsi, nous avons testé deux solutions pour aboutir à un résultat qui convient à notre système de mesure.

3.2.1 Refroidissement à l'huile

Le choix du refroidissement à l'huile est dû au fait que le dissipateur métallique du processeur ne laisse pas passer les radiations infrarouges de la caméra ce qui l'empêchera de prendre des images du cœur de notre microprocesseur. Pour le choix de l'huile, nous avons pris l'huile minérale Sigma-Aldrich M3516 pour sa transparence aux radiations infrarouges. Le système de refroidissement consiste à refroidir l'huile minérale qui va dissiper la chaleur dégagée par le microprocesseur au cours de son fonctionnement. Nous avons choisi un système de refroidissement classique et qui est utilisé dans la plupart des systèmes de refroidissement hydraulique composé principalement d'une pompe, un radiateur, un ventilateur, et des tubes en plastique. Notre choix pour l'huile minérale s'est fait pour plusieurs raisons. L'huile minérale est transparente aux radiations infrarouges. C'est la première raison pour laquelle nous l'avons choisi comme lubrifiant à notre système de mesure. La deuxième raison de notre choix est le fait que l'huile constitue un bon isolant au courant électrique ce qui évitera l'apparition de n'importe quel court circuit électrique pouvant endommager la carte mère ou le microprocesseur. Aussi, sa chaleur spécifique élevée de 1670 ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$) ainsi que sa bonne conductivité thermique de 0.133 ($\frac{W}{m \cdot K}$) sont deux facteurs déterminants pour l'échange thermique entre le processeur et le lubrifiant.

1. Dimensionnement du système de refroidissement
   Le refroidissement par l'huile minérale est basé sur le fait qu'elle présente une capacité meilleure que l'air à évacuer la chaleur à partir d'une source de chaleur par conduction, autrement connu sous le nom de conductivité thermique. La convection forcée est provoquée par une circulation artificielle (pompe, turbine) d'un fluide. Le transfert est plus rapide que dans le cas de convection naturelle. Au cours de ce phénomène, une grande quantité d'énergie calorifique est capable d'être absorbée et déplacée à un moment donné avec un flux d'huile généré par une pompe. Plus ce flux est important, plus l'huile est capable d'absorber et transporter la chaleur beaucoup plus rapidement et efficacement à partir d'une source de chaleur pour la dissiper à une source de refroidissement. Notre travail consiste à dissiper une puissance thermique TDP (Thermal Design Power) d'un microprocesseur AMD Athlon 64 égale à 67 watts. Pour ce faire, nous nous proposons de concevoir les différents composants de notre système en se basant sur une étude dimensionnelle qui est la suivante :
   — choix de la pompe :
      — Expression du flux de chaleur en convection, mesuré en Watts :

$$Q = hA(T_p - T_f)$$

Où, h : coefficient d'échange convectif $(W.m^{-2}.K)$
A : surface de la plaque (m^2)
T_p : température de la plaque (K)
T_f : température du fluide (K)

— Expression du coefficient d'échange convectif :

$$h = \frac{Nu * k}{L}(Wm^{-2}K)$$

Où, Nu : Nombre de Nusselt
K : conductivité thermique $(Wm^{-1}K^{-1})$
L : Longueur caractéristique de la plaque (K)

— Expression du nombre de Nusselt :

$$Nu = 0.664 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{3}}$$

Où, Re : Nombre de Reynolds
Pr : Nombre de Prandtl

— Expression du nombre de Reynolds :

$$Re = \left(\frac{VL}{\nu}\right)$$

Où, V : vitesse de fluide (ms^{-1})
L : Longueur caractéristique de la plaque (m)
ν : viscosité cinématique (m^2s^{-1})

— Expression du nombre de Prandtl :

$$Pr = \left(\frac{\mu * C_p}{K}\right)$$

Où, μ : viscosité dynamique (Nsm^{-2})
C_p : capacité thermique $(Kjkg^{-1}K)$
K : conductivité thermique $(Wm^{-1}K^{-1})$

— Expression du débit de la pompe :

$$D = V * S(Lh^{-1})$$

Où, $S : \frac{pi*d^2}{4}$
d : diamètre des tubes (m)

Tableau 3.2: Données numériques pour le système de mesure

μ $(\frac{N \cdot s}{m^{-2}})$	ρ $(\frac{Kg}{m^{-3}})$	d (m)	C_p $(\frac{kJ}{kg \cdot K})$	L (m)	T_p (K)	T_f (K)	k $(\frac{W}{m \cdot K})$	D $(\frac{L}{h})$
0.0222	840	0.01	1670	0.04	358.15	298.15	0.133	500

Tableau 3.3: Résultats numériques :

P_r	R_e	N_u	h $(\frac{W \cdot K}{m^{-2}})$	V $(\frac{m}{s^{-1}})$	D $(\frac{L}{h^{-1}})$
278.75	2341.84	209.89	697.92	1.55	437.48

— Choix du radiateur :
Le radiateur est l'échangeur de chaleur pour notre boucle d'huile. L'huile minérale passe dans ses canaux minces et parallèles pour aider à dissiper la chaleur. Les radiateurs sont généralement classés avec FPI (Fins Per Inch). Cela signifie que pour chaque pouce nous avons un nombre d'ailettes qui dissipent la chaleur. Il est important ainsi de comprendre que plus le FPI est grand, plus le potentiel de refroidissement de notre radiateur est élevé. Le construsteur [6] a mis en place une formule qui peut estimer le potentiel de refroidissement du radiateur et calculer la quantité de chaleur qu'il peut dissiper en fonction du volume total du radiateur en mm^3 :

$$q = Volume \cdot 0.00023129193 \quad (Watts)$$

$$Volume = L \times W \times H \ (mm^3)$$

Où, $Volume = 122 \cdot 90 \cdot 40 = 439200 \ mm^3$

$$q = 101.58W$$

2. Composition du système de refroidissement
Pour avoir un système de refroidissement convenable et qui peut dissiper toute la chaleur dégagée par le microprocesseur, nous avons besoin d'une liste de composants qui va remplacer l'ancien système de refroidissement à l'air déjà installé sur toutes les cartes mères ordinaires des ordinateurs du laboratoire :

— La pompe : c'est une micro pompe (12V – 1A), elle peut refouler 500 L/h. Ce dispositif qui va aspirer l'huile chaude du récipient et le conduire vers le radiateur qui va le refroidir.

Tableau 3.4: Caractéristique de la micro pompe

paramètre	valeur	paramètre	valeur
Tension maximale	12V	courant maximal	1000mA
Débit maximal	500 L/h	Type de liquide	Eau / huile

Figure 3.6: Première pompe à huile (500 L/h)

— Le radiateur : c'est le composant qui permet l'échange de chaleur entre l'huile minérale et l'air ambiant. Sa fonction principale est d'évacuer la chaleur de l'huile pour éviter sa surchauffe. Donc notre radiateur peut dissiper plus que 100 watts qui sont largement suffisants pour notre microprocesseur AMD Athlon 64.

Figure 3.7: Radiateur avec son ventilateur

— Le ventilateur : c'est un appareil destiné à créer un courant d'air. Ce déplacement d'air va agir sur le radiateur pour le refroidir. Ainsi, nous avons opté pour celui de 90 mm de taille avec une vitesse de rotation de 2600 tpm qui convient parfaitement à notre radiateur.

3.2.2 les installations qui ont échoué

Pour bien concevoir le système, nous avons utilisé les théorèmes de la mécanique des fluides et de transfert thermique pour calculer les performances des composants de notre système de mesure et de ces composants. Toutefois, même avec une analyse dimensionnelle des composants de notre système de mesure, plusieurs installations ont échoué avant d'aboutir à l'installation finale qui est la bonne. Au début, nous avons choisi de plonger notre carte mère et notre processeur dans un bain d'huile minérale pour les refroidir. Cette solution n'a pas été retenue par la suite parce que l'huile a joué le rôle d'isolant pour les deux connecteurs d'alimentation de la carte mère et du microprocesseur. Par la suite, nous avons opté pour la mise en place d'un bloc en plastique sur le microprocesseur pour le refroidir et non pas émerger toute la carte mère dans l'huile. Nous avons choisi dans un premier lieu d'acheter des boîtes de plastique et la coller de façon à entourer le microprocesseur, faire deux trous pour l'entrée et la sortie de l'huile, et coller les tubes à ces deux trous. Vu la faible épaisseur de la boîte, les deux tubes n'ont pas pu tenir face à la pression de l'huile et nous étions dans l'obligation de changer la boîte pour une nouvelle plus intacte. Puisque nous n'avons pas trouvé une boîte avec les caractéristiques et les dimensions souhaitées sur le marché, nous avons conçu une boîte en utilisant un logiciel de conception en 3D qui est CATIA. Nous avons par la suite cherché un atelier pour le réaliser avec le matériau souhaité qui est le plexiglas. Mais, nous avons finalement fait la réalisation manuellement avec des moyens artisanaux. Après la réalisation de la boîte en plexiglas, nous avons enlevé l'ancienne boîte collée avec une colle spéciale sur la carte mère ce qui a endommagé cette dernière et ce qui nous a obligé à la remplacer par une autre et coller la nouvelle boîte là-dessus.

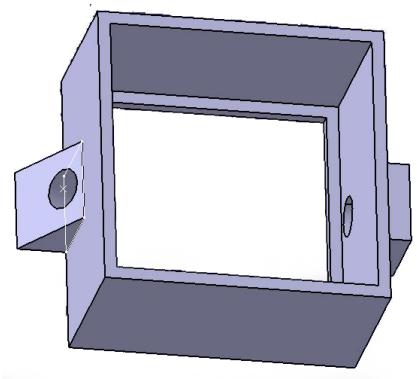

Figure 3.8: water bloc conçu avec
l'outil du CAO CATIA V5

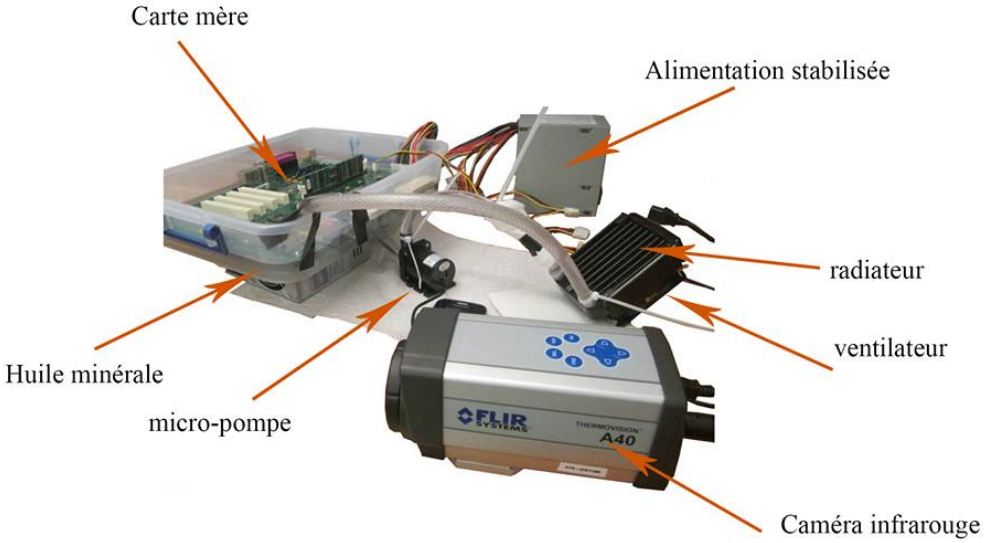

Figure 3.9: Système de mesure avec le dispositif de refroidissement à l'huile

Notre deuxième réalisation avec la nouvelle carte mère a échoué parce que la colle spéciale a touché le socle du microprocesseur ce qui lui a empêché de faire le mouvement habituel pour mettre et enlever le microprocesseur. De même, nous étions obligés d'enlever le water block par les mêmes moyens qu'auparavant. La carte mère a été endommagée de nouveau parce que la colle était trop forte. Pour éviter le problème d'endommagement des cartes mères à cause de la colle trop forte, nous avons commandé une nouvelle colle qui peut être enlevée avec la chaleur à des valeurs très élevées qui ne peuvent pas être atteintes par l'échauffement normal de l'huile par le microprocesseur. Une fois que nous avons fixé la nouvelle carte mère avec la nouvelle colle, nous avons réinstallé tout le système de mesure de nouveau et nous avons lancé un premier test de mesure pour connaître les valeurs de la température. La première chose que nous avons remarquée c'est que la température du microprocesseur ne cessait d'augmenter au cours du temps pour atteindre les 90 °C au bout de quelques minutes. Après cette constatation, nous avons jugé que nous devons agir sur les paramètres de la quantité de chaleur qui sont la surface et la vitesse du fluide. Pour augmenter la surface de contact entre l'huile et le die, nous avons mis une plaque en saphir, connu pour sa transparence aux radiations infrarouge et sa bonne conductivité thermique, au-dessous de notre processeur. Les premières mesures ont montré que cette solution n'était pas suffisante pour dissiper toute la quantité de chaleur dégagée par le processeur malgré une petite amélioration au niveau de l'élévation de la température au cours du temps qui est devenue plus lente. Pour explorer la

deuxième solution agissant sur le fait que le débit de la pompe était insuffisant pour circuler l'huile minérale, nous avons donc décidé de changer la pompe pour une autre plus puissante et avec un débit plus important. Sachant que le débit théorique nécessaire pour faire refroidir le microprocesseur était de 437 litres/heure et que l'ancienne pompe avait 500 litres/heure comme débit, nous avons placé une nouvelle pompe de 2400 litres/heure pour avoir une meilleure vitesse et nous assurer que le système de refroidissement pourra dissiper la chaleur dégagée par le microprocesseur dans les meilleures conditions. Malgré tout cela, la pompe à huile n'avait pas la puissance nécessaire pour faire circuler l'huile dans le système une fois que nous avons purgé le circuit de l'air et c'est à cause de la viscosite de l'huile qui est superieure à celle de l'eau.

Figure 3.10: Deuxième pompe à huile (2400 L/h)

Tableau 3.5: Caractéristiques de la pompe à huile

paramètre	valeur	paramètre	valeur
Tension maximale	12V	courant maximal	13A
Débit maximal	2400 L/h	Type de liquide	huile

3.2.3 Refroidissement avec l'effet de Peltier

Après les nombreux essais qui ont échoué, nous avons opté pour une nouvelle solution qui est le «module de Peltier» ou «cellule de Peltier». Les modules Peltier sont nommés ainsi, car ils mettent en œuvre la thermoélectricité et plus précisément l'effet Peltier qui est un phénomène physique de déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique. L'effet se produit dans des matériaux conducteurs de natures différentes liés par des jonctions (contacts). L'une des jonctions se refroidit alors légèrement, pendant que l'autre se réchauffe. Ce module est alimenté par un courant et présente deux faces, l'une dite froide et l'autre

chaude. L'objet à refroidir doit se mettre sur la face froide, avec la nécessité d'avoir un mécanisme d'évacuation de la chaleur de l'autre côté. L'effet Peltier est utilisé comme technique de réfrigération. Elle est utilisée dans des domaines où la grande précision et la fiabilité sont demandées : recherche, spatiale et militaire, ou dans des applications plus courante comme les glacières.

Les mesures seront faites par une caméra infrarouge sur un microprocesseur Intel Atom D2700. Le système étudié n'est pas très puissant et convient aux taches de calcul légères. Sa puissance dissipée qui ne dépasse pas 10 W et le fait qu'il ne dispose pas d'un dissipateur de chaleur intégré, nous ont permis de mieux exposer le « die » à la lentille de la caméra IR. Pour remplacer le système de refroidissement à l'air, nous avons choisi d'installer un module de Peltier sous le microprocesseur pour dissiper sa chaleur. Partant de l'idée que nous devons éliminer tout obstacle entre la lentille de la caméra et le microprocesseur, nous avons opté pour cette nouvelle solution qui est composée d'un module de Peltier, une plaque de cuivre, une pâte thermique et un dissipateur de chaleur avec son radiateur et son ventilateur. L'ajout d'une plaque de cuivre nous a permis de stabiliser la température au-dessous du processeur et favoriser la dissipation de la chaleur afin d'avoir le même comportement du dissipateur à air.

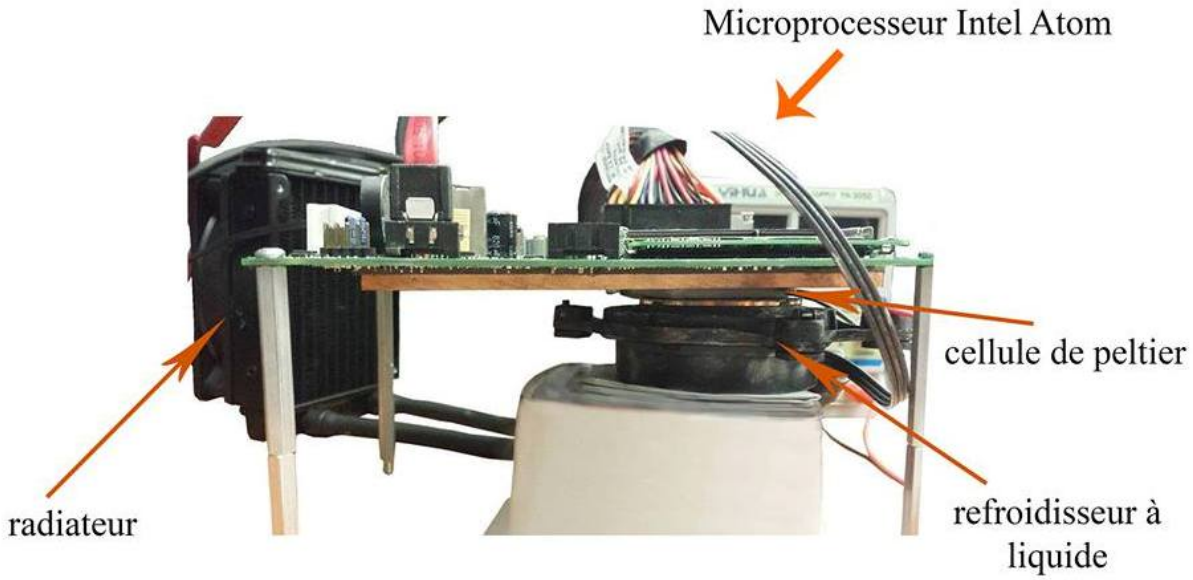

Figure 3.11: Nouveau dispositif de refroidissement «module de Peltier»

Pour réaliser le nouveau dispositif, nous avons percé la carte mère pour faire 4 trous et fixer la plaque en cuivre en dessous. Mais, comme il y aura un jeu entre les deux, nous avons mis une pâte thermique avec les mêmes dimensions que la plaque en cuivre pour éviter tout

espace entre elle et la carte mère. Choisie pour sa bonne conductivité thermique de 1.6 ($\frac{W}{m \cdot K}$), l'interface thermique des matériaux de 3M offre un bon échange thermique sur ses deux faces entre la plaque de cuivre et la carte mère. Il est aussi connu pour son isolation électrique évitant dans notre cas tout risque de court-circuit juste en bas, nous avons installé le module de Peltier avec sa face froide en face de la plaque en cuivre et sa face chaude en face du dissipateur qui va servir à la refroidir. Une fois que tous les composants sont mis en places, nous devons relier les deux bornes de notre module de Peltier avec un générateur électrique. Ce dernier va alimenter la cellule en courant et en tension pour pouvoir dissiper la quantité de chaleur dégagée par le microprocesseur. Cette quantité de chaleur estimée à 10 watts doit être dissipée avec une valeur de 1.6 A et 4.6 V sur les afficheurs du générateur.

Le système de refroidissement avec lequel nous avons réalisé nos mesures est composé des éléments suivants :

— Module de Peltier

La cellule à effet Peltier (aussi appelé effet thermoélectrique) est principalement constituée de deux plaques conductrices et des éléments semi-conducteurs. L'effet Peltier est un phénomène physique de déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique. L'effet se produit dans des matériaux conducteurs de natures différentes liés par des jonctions (contacts). Une des jonctions se refroidit alors légèrement, pendant que l'autre se réchauffe. Cet effet a été découvert en 1834 par le physicien Jean-Charles Peltier. L'effet Peltier est lié au transport d'entropie par les porteurs de charge (électrons ou trous) au sein du matériau.

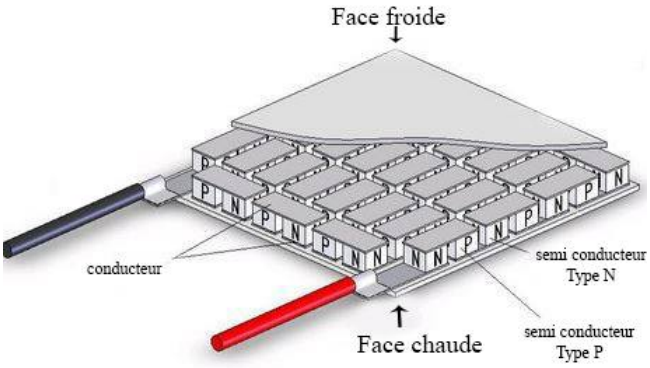

Figure 3.12: Module de Peltier [2]

La cellule de Peltier peut dissiper jusqu'à 60 W qui est une valeur très grande pour notre système étudié. Pour avoir juste la puissance dissipée nécessaire, nous devons identifier les paramètres tension / courant de notre module. Par la suite, nous devons

le contrôler en tension afin d'avoir une température stable. La figure 3.13 nous montre le graphe de puissance / tension du module de Peltier utilisé. Pour déterminer les paramètres tension / courant, nous allons tenir compte de la puissance dissipée de notre processeur Atom, égale à 10 W, ainsi que de la différence entre les deux faces de la cellule qui ne dépasse pas 30 °C. À partir de ce graphe, nous pouvons déterminer que pour une valeur de 4.6 V la cellule de Peltier dissipe 10 W.

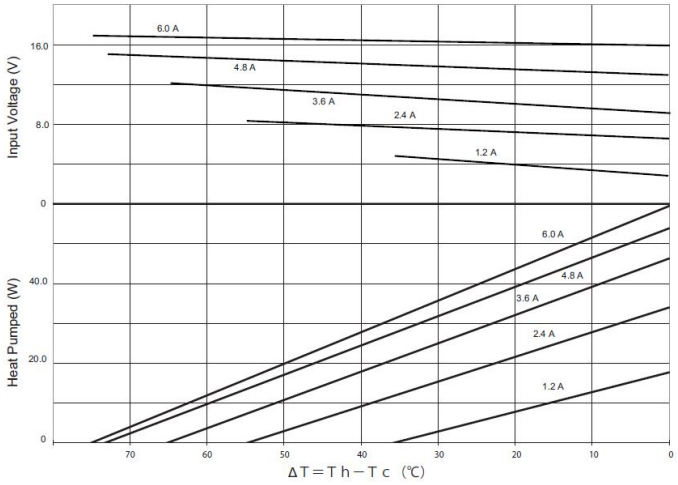

Figure 3.13: Abaque de puissance / tension d'un module de Peltier

— Alimentation de laboratoire : Pour appliquer un courant aux bornes de la cellule de Peltier, nous avons cherché un moyen pour l'alimenter en courant. L'alimentation que nous avons choisie est une alimentation de précision qui sert à effectuer des mesures, des tests, des dépannages. Cette alimentation transforme, redresse et régule les tensions ainsi que les courants de sorties, de sorte que l'on puisse effectuer des mesures sans détériorer les éléments à tester, que ce soient des composants ou des circuits, dans notre cas, le module de Peltier.

— Le refroidisseur : Pour que la cellule de Peltier fonctionne efficacement, nous avons constaté qu'il faudrait qu'il y ait quelque chose sur la face chaude du module pour absorber la chaleur. Sans cela, l'efficacité de la cellule serait perdue. Pour résoudre ce problème, nous avons acheté une unité de refroidissement du CPU liquide, exposé à la face chaude, pour absorber la quantité de chaleur dégagée par la cellule. C'est un dispositif qui fait circuler l'eau, meilleure conductrice que l'air, dans un radiateur refroidit par un ventilateur et le mène à un water block en contact direct avec la plaque en cuivre pour la refroidir. La conception de la face froide aussi en cuivre, permet un meilleur échange de chaleur.

Figure 3.14: Refroidisseur

3.3 Composition du système de mesure retenu

La plate-forme de mesure retenue est composée des composants suivants :

— La carte mère :

La carte mère est le cœur de tous les ordinateurs. Elle est essentiellement composée de circuits imprimés et des ports de connexion, par le biais desquels elle assure la connexion de tous les composants et périphériques propres à un micro-ordinateur (mémoires , microprocesseur, connexions, etc.). Sur notre carte mère Intel D2700DC, nous avons installé un système d'exploitation Ubuntu 12.04 avec une distribution Linux.

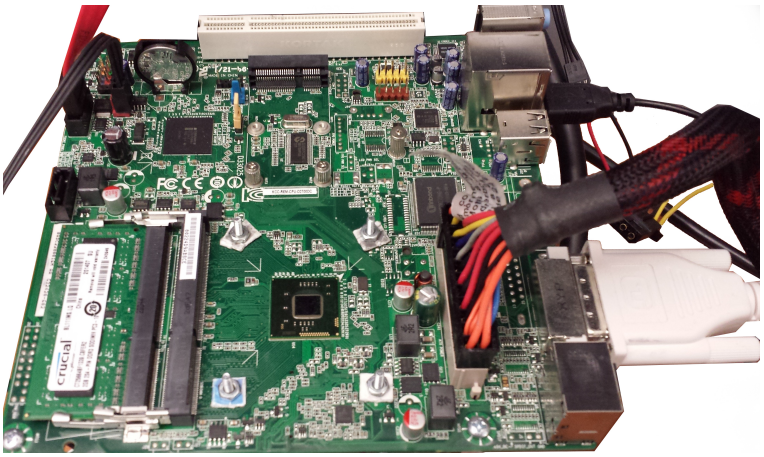

Figure 3.15: carte mère Intel D2700DC

Notre plate-forme d'étude est constituée d'un microprocesseur Intel Atom D2700 embarqué sur la carte mère. Lancé en 2011, Atom a été destiné principalement aux netbooks. Il est reconnu principalement par sa faible consommation et son faible dégagement thermique (TDP) favorisant ainsi leur intégration dans des systèmes compacts.

Tableau 3.6: Caractéristiques du processeur Atom

paramètre	valeur	paramètre	valeur
CPU	Intel Atom D2700	Vdd	0.91V / 1.21V
Technologie	32 nm	TDP	10 W
Fréquence	2.13 GHz	Nombre de coeurs	2

— Une caméra infrarouge Flir A40 qui offre une gamme spectrale de 7.5 à 13 μm avec une fréquence de 60Hz et une résolution d'image de 320 x 240 pixels. Elle offre aussi une précision de $\pm 2\,^{\circ}C$. Le logiciel pour cette caméra est une version d'essai de « ThermaCAM Researcher 2.10 pro » téléchargée à partir du site web de Flir [23]. Il est installé sur un ordinateur sur lequel nous faisons l'acquisition des cartes thermiques. La figure 3.16 montre tout le système de mesure par thermographie infrarouge

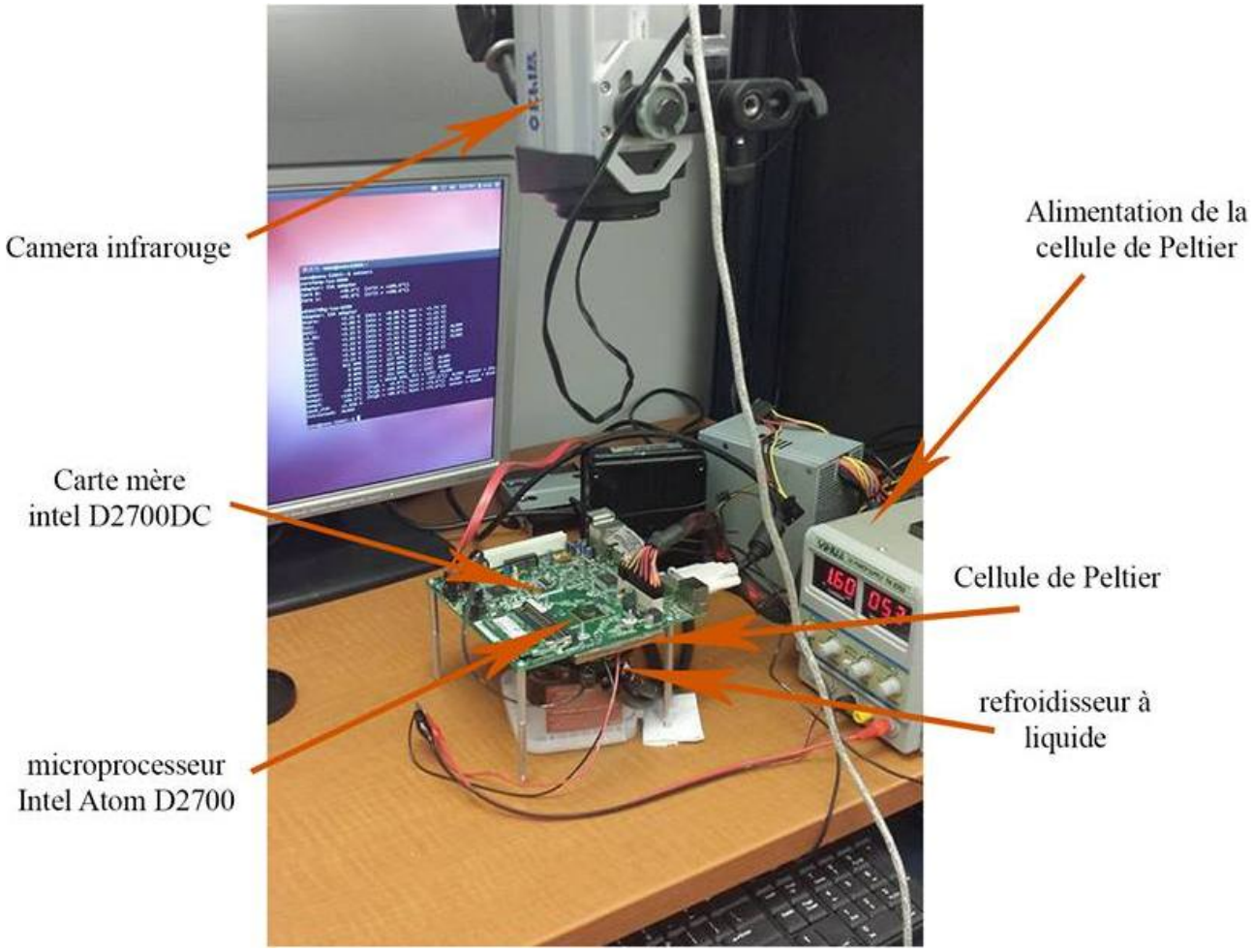

Figure 3.16: Système de mesure avec le nouveau dispositif de refroidissement «module de Peltier»

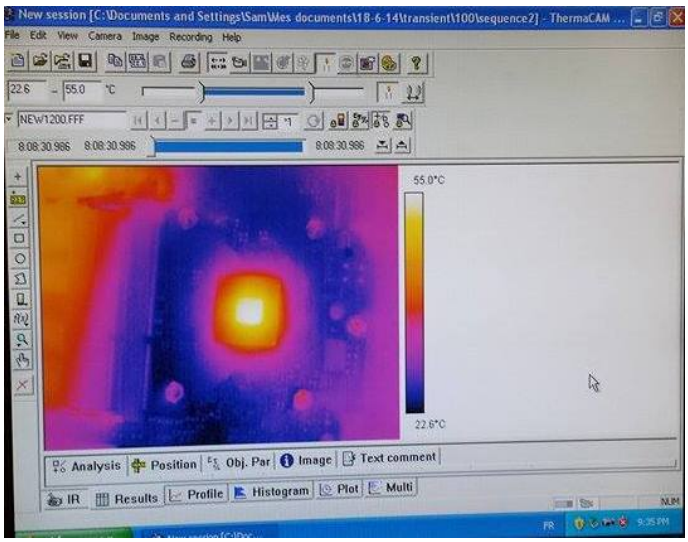

Figure 3.17: Logiciel ThermaCam Reasercher pour acquerir les données

La figure 3.18 montre la région de transparence de silicium comprise entre $2-5\mu m$. Dans cette region, le silicium transmet la plus grande quantite de radiations infrarouges. Cette zone de transparence limite la détection des images à travers la couche supérieure du die. Les images récoltées par notre caméra incapable de voir la température à travers des couches du circuit sont celles de la surface supérieure. Cette température sur la surface reste assez proche de celle de jonction qui est la température maximale dans un processeur.

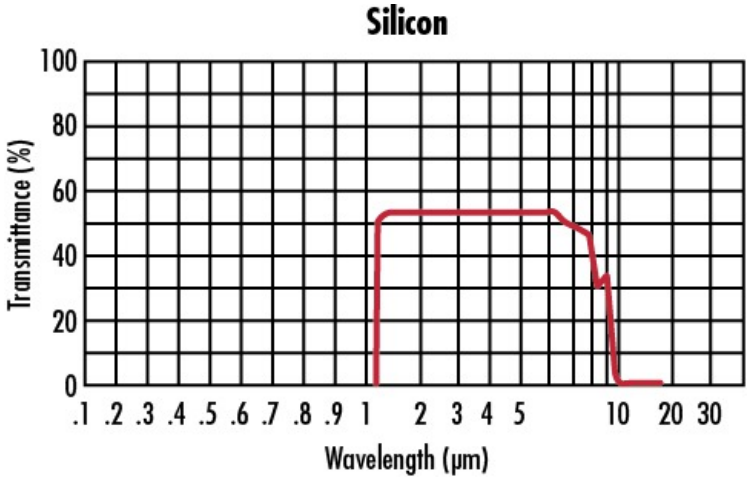

Figure 3.18: région de transparence du silicium

3.4 Extraction les données thermiques

Pour extraire les valeurs de la température inscrites sur un fichier image Flir, nous avons utilisé un outil de traitement d'image « Flir tools » qui nous permet d'analyser les données brutes enregistrées par la caméra infrarouge et les convertir en données numériques utilisables dans le processus de validation.Les erreurs de conversion sont de l'ordre des erreurs dues à une multiplication de 64 bits et qui restent négligeables.

La figure 3.19 nous montre un aperçu du logiciel Flir tools.

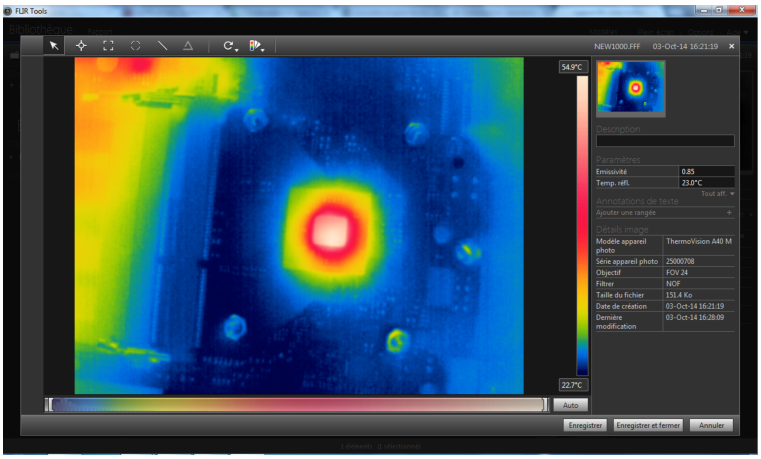

Figure 3.19: Logiciel Flir Tools pour analyser les données

En se référant au document de Flir [10], la méthode avec laquelle Flir tools convertit les données brutes est décrite dans la partie suivante :

$$T = \frac{B}{Ln(\frac{R}{S-O} + F)}(K)$$

Où,
- S : 16-bit valeur du signal numérique
- R : Planck R (constante)
- B : Planck B (valeur dans l'intervalle 1300 - 1600)
- F : Planck O (valeur dans l'intervalle 0.5 - 2)
- O : Décalage «Offset» (constante)

Pour appliquer cette formule sur nos images, nous devons résoudre d'autres équations et définir nos conditions aux limites :

Émissivité de l'objet < 1

Distance de l'objet $= 0$

Transmission optique externe $= 1.0$

Ensuite, nous devons calculer la valeur de la radiance des objets reflétés. Pour cela, nous devons passer par deux autres opérations de calcul :

$$S_{ref} = \frac{R1}{R2 * e^{(\frac{B}{T_{ref}})} - F} - O$$

Où, S_{ref} : valeur linéaire à la radiance reflétée de l'objet
T_{ref} : température reflétée (K)
e : nombre d'Euler

Et,

$$S_{obj} = \frac{S - (1 - Em) * S_{ref}}{Em}$$

Où, S_{obj} : valeur linéaire à la radiance mesurée de l'objet
S : 16-bit valeur du signal numérique
Em : Émissivité de l'objet

Par la suite, nous prenons la formule de la température et nous remplaçons S par la valeur calculée de la radiance de l'objet S_{obj} pour calculer la valeur de la température de l'objet :

$$T_{obj} = \frac{B}{Ln(\frac{R1}{R2*(S_{obj}-O)} + F)}$$

Où, T_{obj} : température de l'objet K
R : $\frac{R1}{R2}$
$R1$: Planck $R1$ (constante)
$R2$: Planck $R2$ (constante)
Ln : Logarithme népérien
B : Planck B (constante). valeur dans l'intervalle 1300 - 1600
F : Planck F (constante). valeur dans l'intervalle 0.5 - 2
O : Planck O (constante). Décalage «Offset» : valeur négative

Afin de pouvoir comparer les mesures faites par notre système de mesure et les modèles thermiques, nous devons traiter les images thermiques réalisées par la caméra infrarouge soit par un logiciel d'analyse thermique comme Flir tools, soit par l'implémentation d'un algorithme de conversion des données brutes enregistrées sur l'image en des valeurs de la température qui nous serviront pour la validation des modèles thermiques. La figure 3.20 montre l'algorithme nécessaire dans le cas d'une implémentation d'un script de conversion.

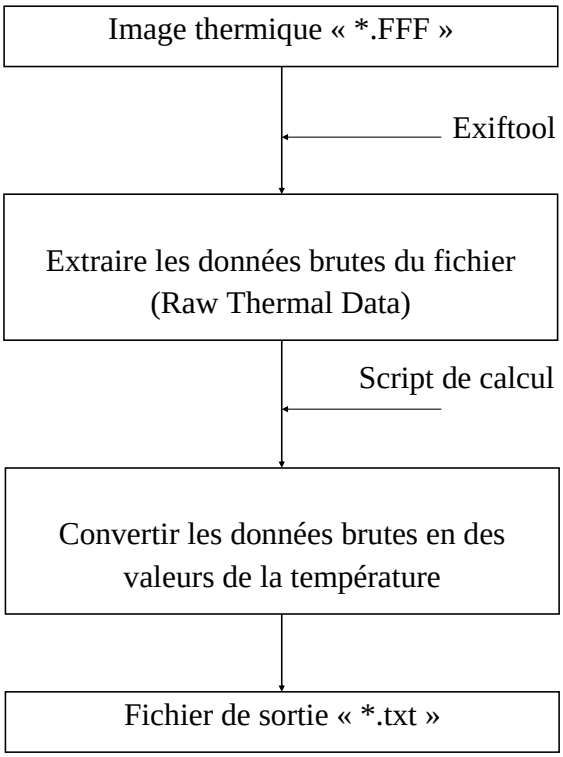

Figure 3.20: Implémentation d'un script de conversion

CHAPITRE 4

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats expérimentaux de nos mesures par thermographie infrarouge ainsi que les résultats des comparaisons pour valider le modèle thermique de simulation.

4.1 Description du système étudié

Notre système étudié est le microprocesseur Intel Atom D2700. Afin de simuler son comportement avec la précision requise, la création du modèle doit refléter sa géométrie ainsi que les conditions aux limites. Notre système échange de la chaleur avec son environnement extérieur comme la carte mère et l'air ambiant. Afin de limiter la complexité de notre étude thermique par comparaison sans perdre de la précision, nous allons choisir les éléments pertinents à modéliser ainsi que les conditions aux limites.

4.1.1 Composition du système étudié

Le système étudié sur lequel nous avons réalisé nos mesures thermiques est le processeur Intel Atom D2700. La figure 4.1 présente le floorplan du modèle composé de deux cœurs avec une vitesse de 2.13 GHz.

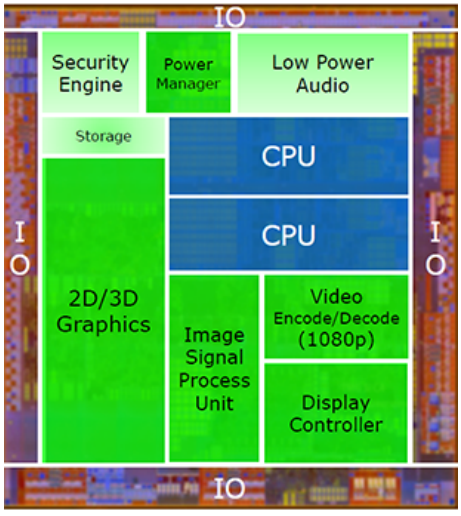

Figure 4.1: Floorplan de l'Atom D2700

La création d'un modèle du système étudié doit tenir compte de sa composition ainsi que les différents matériaux avec lesquels sont réalisés ses éléments. Pour cela, nous avons modélisé les différentes couches de notre système. Puisque le processeur échange de la chaleur avec son environnement constitué essentiellement de l'air ambiant et de la carte mère, nous avons ajouté deux couches à notre modèle de simulation, la pâte thermique et la plaque en cuivre, pour avoir un résultat plus réaliste. Le tableau 4.1 présente tous les éléments de notre modèle ainsi que les matériaux et les épaisseurs de chaque couche.

Tableau 4.1: Éléments du système étudié

Élément	Matériau	Épaisseur (mm)
Die	Silicium	0.7
Couche active	Mélange métal-diélectrique	0.01
Billes C4	Alliage Étain-Plomb	0.979
Substrat	FR4	1
Billes BGA	Alliage Étain-Plomb	0.3
Carte mère	FR4	1.5
Pâte thermique	TIM	2
Diffuseur de chaleur	Cuivre	5

Étant donné que notre système représente une forme géométrique rectangulaire et que toutes ses couches constitutives sont uniformes, cela nous a simplifié la modélisation de la couche assurant la connexion entre la carte mère et le package qui contient plusieurs billes. Les paramètres thermiques des différents matériaux modélisés dans notre système ont été pris à la fois de Comsol[3] et de Hotspot [19], en cas de besoin. La figure 4.2 résume le modèle thermique utilisé.

4.1.2 Conditions aux limites

Pour déterminer les conditions aux limites de notre modèle, nous avons émis certaines hypothèses afin de déterminer les échanges de chaleur entre notre modèle et son environnement. Notre système étudié, ayant la géométrie d'une boîte rectangulaire, possède six faces auxquelles nous devons déterminer ses conditions aux limites. Les images que nous avons prises avec la caméra infrarouge ont montré que la température devient fixe sur le bord de notre modèle. Nous allons ainsi imposer une température constante sur les faces latérales du package appelée Tl (température latérale).

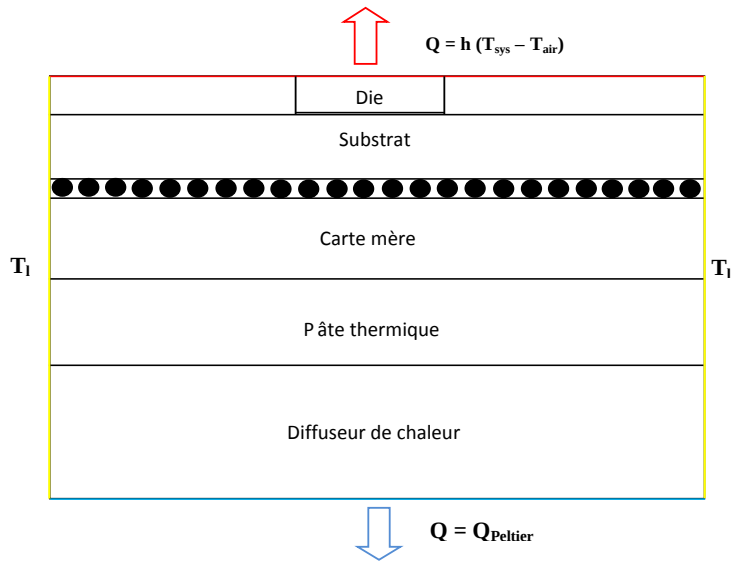

Figure 4.2: Modèle thermique du système proposé avec conditions aux limites

Sur la face supérieure, le système échange la chaleur avec l'air ambiant par convection naturelle vu que nous avons retiré le dissipateur thermique pour laisser le passage aux radiations infrarouges détectées par la caméra. Au niveau de la face inférieure, la chaleur dégagée par le système étudié est absorbée par le système de refroidissement à effet de Peltier. Nous imposons ainsi une condition aux limites égale au flux prélevé par la cellule de Peltier.

4.1.3 Réalisation du modèle

Afin de valider le modèle thermique du système proposé, nous avons utilisé deux modèles de simulation pour comparer les résultats expérimentaux aux résultats de la simulation. Deux modèles ont été implémentés avec deux logiciels différents. La première implémentation a été réalisée avec Comsol en utilisant un maillage tétraédrique. Alors que la deuxième implémentation a été réalisée avec ICTherm qui utilise un maillage orthogonal.

Modélisation du système avec ICTherm

ICTherm est un simulateur thermique pour les composants électroniques basé sur la méthode des volumes finis. Il a été conçu pour être plus rapide et plus fiable que les autres modèles thermiques. Pour son bon fonctionnement, ICTherm a besoin de quelques informa-

tions en entrée qui sont la structure physique du composant ainsi sa puissance dissipée. Pour décrire la structure du composant, il faut spécifier un fichier de configuration qui contient ses propriétés physiques et géométriques [9]. Il est constitué de 4 types de section : matériaux, dimensions, source de chaleur, coefficient de transfert thermique. La sortie de notre simulateur est la donnée température. Chaque composant de la puce est modélisé comme un bloc rectangulaire. Un bloc est défini par sa dimension et sa position. On peut aussi attribuer à un bloc un matériau et une valeur de puissance. Les blocs et les matériaux qui composent la puce doivent être déclarés dans les fichiers de configuration donnés à ICTherm.

```
[block]
name=bulk
length=10e-3      % dimension along the x-axis (m)
width=10e-3       % dimension along the y-axis (m)
height=0.2e-3     % dimension along the z-axis (m)
x=5e-3            % position along the x-axis (m)
y=5e-3            % position along the y-axis (m)
z=0.6e-3          % position along the z-axis (m)
material=silicon  % constitutive material
power=0           % power dissipation of the block (W)
```

Figure 4.3: Instanciation d'un bloc sous ICTherm

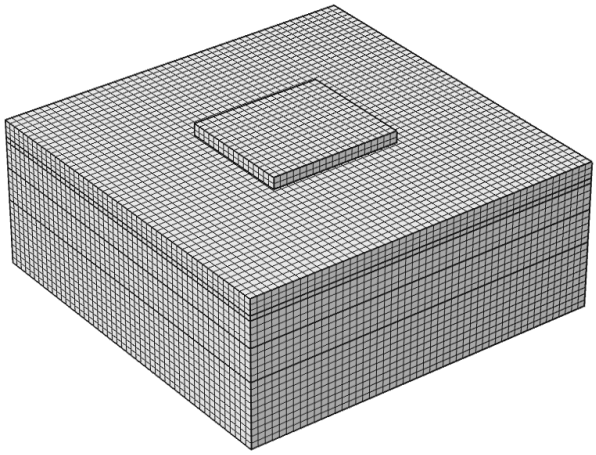

Figure 4.4: Maillage orthogonal de ICTherm

Modélisation du système avec Comsol

Comsol est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis[3]. Il permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie. L'utilisateur doit définir la géométrie, les propriétés des matériaux, le maillage ainsi que les différents paramètres thermiques et les conditions aux limites. La figure 4.5 montre le maillage tétraédrique pour discrétiser le système étudié.

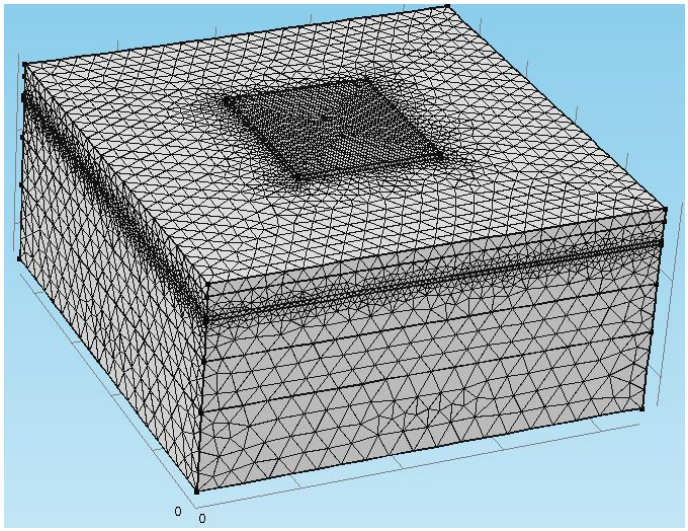

Figure 4.5: Maillage tétraédrique de Comsol

4.2 Validation du modèle thermique au régime permanent

Pour valider notre système étudié, nous avons testé un paquet de Benchmark Parboil bfs [22] qui sert à exploiter les ressources de notre microprocesseur à 100% et à 60% pendant une période de temps qui peut atteindre quelques minutes et mesurer ainsi sa réponse par rapport à ses charges de travail jusqu'à ce qu'il atteigne le régime permanent. De même, une mesure de la température par les capteurs embarqués sur le microprocesseur nous a aidé à déterminer la valeur de l'émissivité afin d'étalonner la caméra infrarouge. La figure 4.6 montre que les valeurs maximales de la température détectées par les capteurs du processeur sont égales à celles relevées par la caméra infrarouge ce qui confirme l'exactitude de la valeur de l'émissivité introduite dans le logiciel d'acquisition des images thermiques.

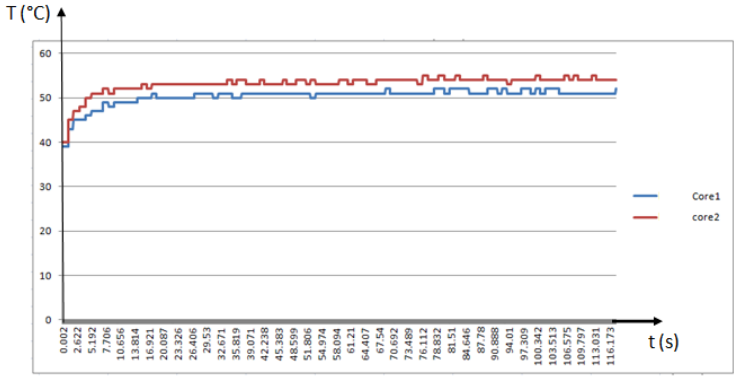

Figure 4.6: Valeurs de la température relevées par les capteurs

D'autre part, un fichier de configuration tenant compte du floorplan et de la puissance consommée a été introduit dans chacun des deux modèles pour simuler son comportement thermique. La sortie est un fichier contenant les valeurs de la température du régime stationnaire. Nous avons par la suite comparé les valeurs de la température stockées dans des fichiers de sortie pour chaque simulateur avec les valeurs de température mesurées avec la caméra infrarouge.

Dans le but d'avoir une précision maximale durant le processus de comparaison des différents résultats, nous avons implémenté un programme de comparaison entre les fichiers de sortie des simulateurs et du fichier de la température mesurée. La sortie de notre programme est un fichier incluant les valeurs des différents fichiers ainsi que le calcul de la valeur absolue de la différence de température en tout point du modèle étudié. Nous avons aussi ajouté comme résultats la comparaison entre les valeurs minimales, maximales et moyennes de chaque fichier pour des fins statistiques. La figure 4.7 nous montre l'algorithme adopté pour l'implémentation du programme de comparaison des résultats

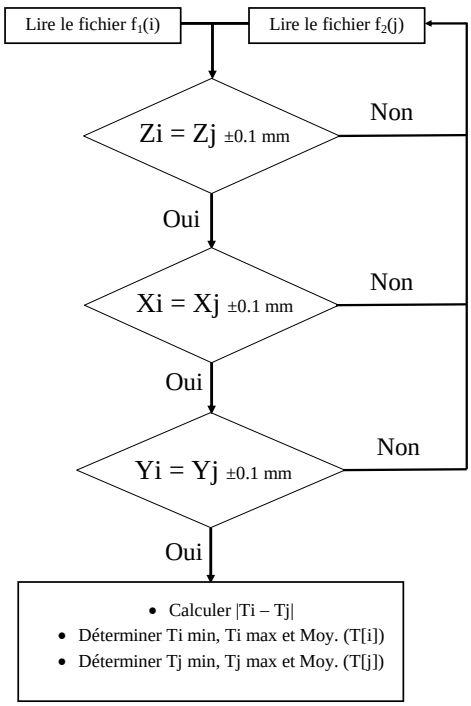

Figure 4.7: L'algorithme du programme de comparaison des résultats

4.2.1 Comparaison à 100% de la charge du processeur

Pour avoir des données plus fiables qui nous permettent de comparer les résultats, nous avons choisi de tracer la réponse du nôtre modèle thermique sous différentes charges. Pour commencer, nous avons exploité ses ressources à 100 % ce qui nous permettra d'introduire la puissance maximale que peut dissiper un processeur Atom. Par l'intermédiaire de la caméra infrarouge, nous avons pris une image du système après quelques secondes du lancement du benchmark, une fois le régime stationnaire est établi. Par la suite, nous avons traité cette image en utilisant le logiciel Flir tools qui va analyser toutes les données inscrites sur l'image. En introduisant le fichier de configuration du modèle à ICTherm, nous simulons le comportement du modèle pour avoir les résultats de la simulation dans un fichier de sortie incluant les valeurs de la température en tout point du modèle. De même, nous simulons notre modèle (voir figure 4.2) avec Comsol avec les paramètres de configuration, matériaux, dimensions indiqués dans le tableau 4.1. Les figures 4.8 et 4.9 nous montrent l'allure de la température sur le processeur pendant les mesures réelles ainsi que l'image obtenue par simulation.

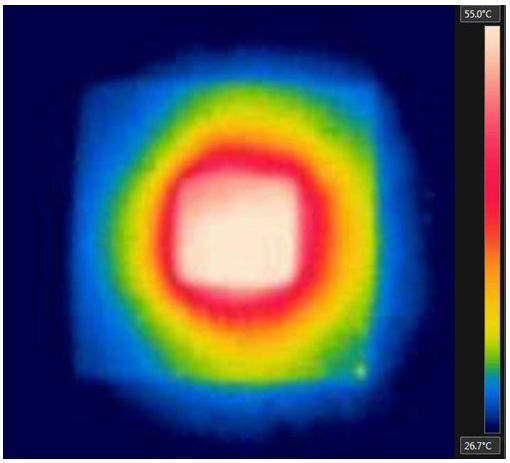

Figure 4.8: Image prise par la caméra infrarouge à 100% de puissance

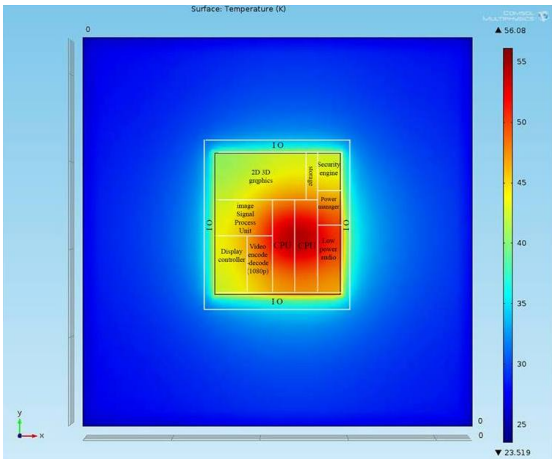

Figure 4.9: Simulation du modelé avec Comsol à 100% de puissance

La taille du processeur Atom sur l'image thermique de la caméra est égale à $(60X60)pixels$ ce qui donne la surface d'un pixel égale à $(0.36X0.36)mm$ qui est une surface beaucoup plus grande que celle des éléments discrétisés par les modèles de simulation qui sont de l'ordre de $(0.1X0.1)mm$ dans les zones les plus proches de la source de chaleur. Les images montrent bien que la zone la plus chaude du système est celle du cœur du processeur qui représente la

source de puissance. De même, nous remarquons que la propagation de la chaleur sur la face supérieure du système est semblable pour les deux images. La figure suivante nous montre la localisation du point le plus chaud de notre système.

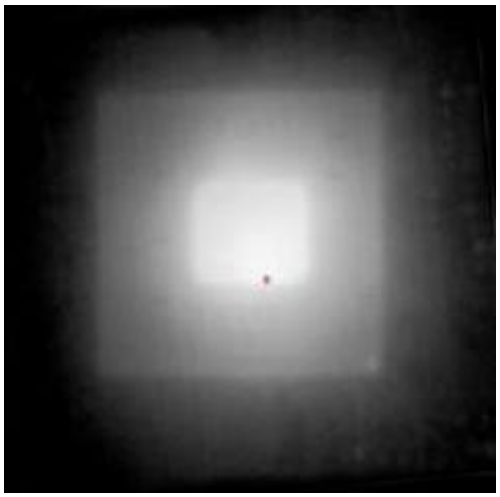

Figure 4.10: Localisation du point le plus chaud

Pour valider nos observations, nous avons cherché l'emplacement des points les plus chauds, la valeur minimale, la valeur maximale ainsi que la valeur moyenne de la température pour les trois types de résultats. Le tableau 4.2 montre une comparaison entre les mesures et les modèles thermiques.

Tableau 4.2: Comparaison des résultats à 100% de puissance

	Mesures	Comsol	ICTherm
Min (°C)	26.72 ±2 °C	26.63	27.22
Max (°C)	55 ±2 °C	54.14	54.23
Moyenne sur le die (°C)	48.62 ±2 °C	48.71	48.76

Ce tableau nous montre très bien que les valeurs extremums de la température sont presque les mêmes pour les trois résultats. Pour les températures minimales et maximales, une erreur inférieure à (±1 °C) a été enregistrée. Donc, La figure **??** nous permet aussi de constater que la valeur moyenne entre les différents résultats est presque la même. L'erreur maximale, tellement petite de 0.06 dans ce cas, est dans la précision de la caméra (±2 °C) ce qui présente un bon résultat pour la validation de notre modèle. En comparant l'emplacement du point chaud sur notre image à son emplacement aux deux modèles de simulation, nous

constatons qu'il a presque gardé la même position. La distance dans ce cas aussi ne dépasse pas $0.1mm$, ce qui est au-dessous de l'erreur de discrétisation de la caméra.

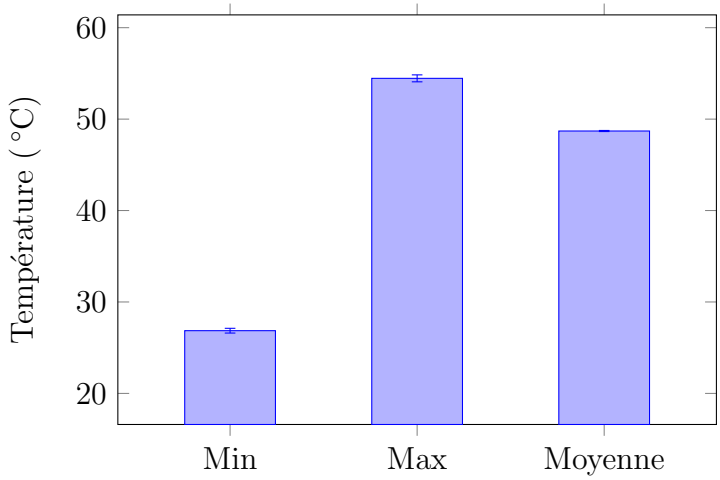

Figure 4.11: Moyenne des températures (min, max et moyenne) obtenues par Thermographie IR et avec les deux modèles

4.2.2 Comparaison à 60% de la charge du processeur

Afin de mieux explorer les capacités de nos simulateurs et valider les résultats trouvés lors du fonctionnement à 100 %, nous avons lancé une deuxième expérience qui a pour objectif de simuler le fonctionnement du processeur à 60 % de ses capacités et déterminer ainsi si les mesures réelles vont prouver la simulation ou bien nous allons trouver une différence. Sous Linux, nous pouvons limiter le fonctionnement d'une tâche par une commande en fonction du pourcentage des ressources de microprocesseur. Ceci nous a permis d'atteindre le pourcentage souhaité avec un pourcentage d'erreur de 5% due aux différentes applications systèmes en charge. En suivant les mêmes étapes réalisées avec la première expérience afin d'obtenir les différents résultats à comparer, nous allons dresser une suite de constatations.

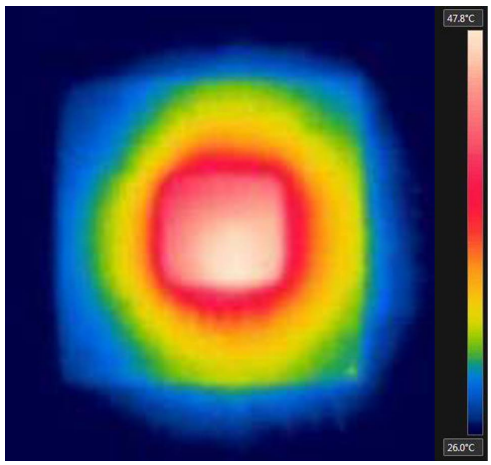

Figure 4.12: Image prise par la caméra infrarouge

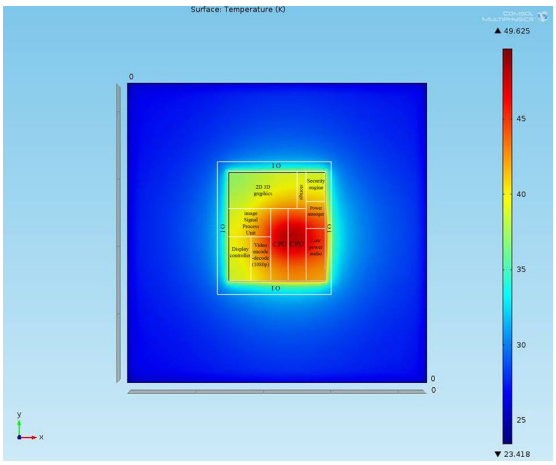

Figure 4.13: Simulation du modèle avec Comsol

La comparaison des deux images en figure 4.13 et 4.12 montre bien que le modèle avait le même comportement thermique. Ainsi, ce sont les mêmes zones qui s'échauffent le plus. Nous cherchons par la suite le point le plus chaud de notre système. La figure 4.14 nous montre avec précision la localisation du point chaud.

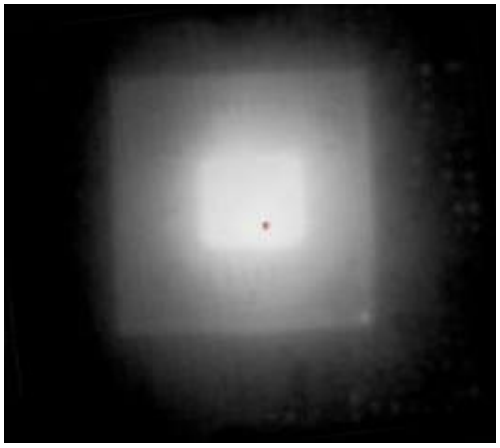

Figure 4.14: Localisation du point le plus chaud

Nous constatons à partir de cette figure, traitée par Flir tools, que le point chaud a changé sa position sur le cœur du processeur. On peut identifier la distance entre les deux points par la superposition des deux images (figures 4.14 et 4.13). En comparant l'emplacement du point chaud sur notre image à son emplacement aux deux modèles de simulation, nous constatons qu'il a presque gardé la même position. La distance dans ce cas aussi ne dépasse pas $0.2mm$,

autour d'un pixel et donc dans la marge d'erreur de la caméra. Pour comparer nos mesures réelles avec celles des deux simulateurs, nous avons dressé le tableau 4.3.

Tableau 4.3: Comparaison des résultats à 60% de puissance

	Mesures	Comsol	ICTherm
Min (°C)	25.82 ±2 °C	25.93	26.40
Max (°C)	49.9 ±2 °C	48.07	48.14
Moyenne sur le die (°C)	44.31 ±2 °C	43.69	43.74

Ce tableau comparatif des résultats obtenus à 60 % de charge du microprocesseur confirme bien les résultats obtenus lors de la première expérience. Il montre très bien que les valeurs extremums de la température sont presque les mêmes pour les trois résultats. Pour les températures minimales et maximales, une erreur inférieure à (±1 °C) a été enregistrée.

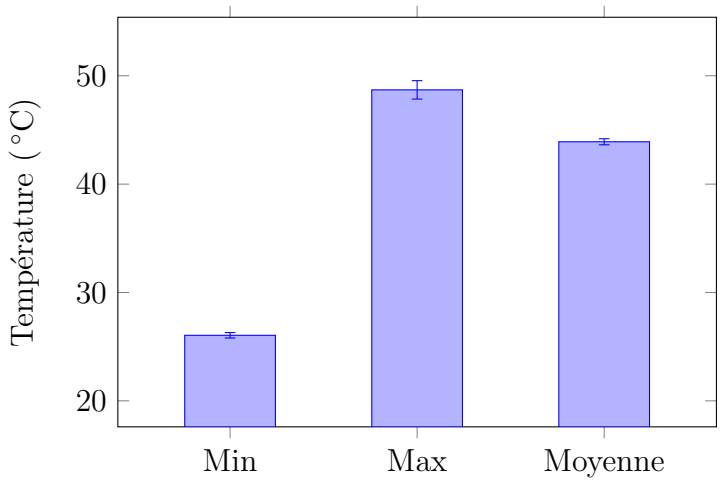

Figure 4.15: Moyenne des températures (min, max et moyenne) obtenues par Thermographie IR et avec les deux modèles

La figure 4.15 nous permet aussi de constater que la valeur moyenne entre les différents résultats est petite. L'erreur maximale, de 0.28 dans ce cas, est dans la précision de la caméra (±2 °C) ce qui présente un bon résultat pour la validation de notre modèle.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

5.1 Synthèse des travaux

En conclusion, la réalisation d'un système de mesure de la température par thermographie infrarouge nous a permis de valider la précision de deux modèles de simulation thermiques, Comsol et ICTherm. Dans les deux sections 5.2 et 5.3, nous discuterons les limitations ainsi que les améliorations que nous pourrions apporter à notre système de mesure pour augmenter la précision des données récoltées.

Afin d'aboutir à ces résultats, nous étions confrontés à plusieurs problèmes que nous devions résoudre. Dans une première étape, afin de pouvoir utiliser la caméra infrarouge, le remplacement du système de refroidissent du processeur par un autre permettant le passage des radiations infrarouges était nécessaire. Deux solutions ont été explorées à savoir l'utilisation de l'huile minérale en tant que lubrifiant ou l'utilisation du refroidissement thermoélectrique. Avec la première solution, nous n'avons pas pu maintenir la température stable ce qui nous a poussés à abandonner cette voie pour l'utilisation d'un module à effet de Peltier. En effet, ce choix était convenable pour notre système étudié caractérisé par son petit dimensionnement et sa faible puissance. De plus, il nous a permis de contourner les inconvénients du refroidissement à l'huile avec un meilleur contrôle de la température.

Dans une deuxième étape et après avoir mis en place notre plate-forme de mesure, nous avons pu établir les différentes cartes thermiques via la collecte des températures en temps réel. Les mesures ont été réalisées à différents pourcentages d'exploitations des performances du microprocesseur Atom. Ceci avait pour but de tester le comportement thermique de notre système étudié vis-à-vis de l'augmentation de sa consommation en puissance dynamique. Les expériences ont montré que la température augmente proportionnellement à l'augmentation de la charge de travail attribuée.

Afin de valider les modèles de simulation, la comparaison des résultats obtenus par les mesures réelles avec ceux obtenus par simulation a été réalisée. Nous avons pu démontrer que les résultats obtenus par les deux modèles de simulation sont conformes aux résultats expérimentaux et ceux pour les valeurs minimales et maximales. Que ce soit en utilisant un processeur à 100% ou à 60% de ses performances, pour les températures minimales et maximales, une erreur inférieure à ($\pm 1\,^{\circ}\mathrm{C}$) a été enregistrée. Mais, l'écart était beaucoup plus important pour les valeurs moyennes et cela est dû principalement à la distance fixe

entre les points mesurés dans les zones de changement de matériaux qui est la distance entre les différents pixels de l'image thermique. Alors que la discrétisation du modèle thermique permet une précision plus adéquate pour calculer la température à un intervalle d'espace plus petit que celui entre deux pixels.

Finalement, en utilisant le logiciel d'analyse thermique, nous avons identifié les points les plus chauds de notre processeur sous test. En comparant l'emplacement du point chaud sur notre image à son emplacement aux deux modèles de simulation, nous constatons qu'il a presque gardé la même position. La distance dans ce cas aussi ne dépasse pas 0.2 mm. Cette pratique peut aider les concepteurs à mieux placer les capteurs embarqués sur les puces afin d'obtenir des valeurs de températures plus précises et avec une erreur spatiale plus faible.

5.2 Limitations de la solution proposée

Dans la section 5.1, nous avons expliqué les différentes expériences que nous avons réalisées, les résultats et les conclusions que nous avons pu tirer. Cette section va expliquer certains points qui ont limité notre recherche et par conséquent les conclusions que nous avons pu obtenir

5.2.1 Limitations matérielles

1. La caméra infrarouge :

   Pour réaliser le système de mesure par thermographie infrarouge, nous avons eu recours à une caméra infrarouge Flir A40 qui offre une gamme spectrale de $7.5 - 13\mu m$. Cette caméra thermique présente certaines limitations technologiques :

   — Étant donné que la région de transparence aux radiations infrarouges du silicium se situe entre $2-5\mu m$, la caméra infrarouge utilisée ne peut relever que la température de la surface du die. Elle n'est pas capable de voir la température à travers les couches du circuit intégré. Cette température reste assez proche de la température de jonction

   — Le datasheet de la caméra indique qu'elle offre une erreur de $\pm 2\,^{\circ}\mathrm{C}$

   — Pour avoir des mesures réelles, nous devons étalonner la caméra infrarouge par l'identification de la valeur d'émissivité de l'objet à mesurer

   Toutes ces contraintes technologiques de la caméra infrarouge utilisée limitent la précision de notre système de mesure.

2. Le processeur Atom : Le système étudié est le processeur Intel Atom D2700, composé de deux cœurs cadencés à 2.13 GHz, n'est pas très puissant et convient aux tâches de calcul légères. Sa puissance dissipée qui ne dépasse pas 10 W nous a empêché de tester

les performances de notre système de refroidissement à des valeurs de puissance d'un processeur à haute fréquence.

5.2.2 Limitation logicielle

Le modèle de simulation thermique ICTherm est un logiciel en cours de développement. Malgré les performances en termes de vitesse d'exécution, de précision et de consommation de ressources déjà testées par son concepteur, nous n'avons pas pu tester sa fonctionnalité pour la simulation des circuits en régime transitoire. Notre travail s'est limité au régime permanent du fonctionnement d'un circuit intégré.

5.3 Améliorations futures

Nous avons observé durant nos expériences une similarité entre les deux types de mesure que nous avons effectuée, à savoir les mesures par les capteurs et les mesures par la caméra infrarouge. Afin de collecter des mesures de température plus précises, nous pouvons placer des thermocouples sur différentes zones sur la puce, ce qui pourra aider les concepteurs des systèmes informatiques à mieux contrôler les points chauds sur un microprocesseur en temps réel et diminuer le risque de son endommagement. De même, cela peut nous offrir une meilleure précision sur les valeurs de la température relevées par le capteur afin de pouvoir étalonner la caméra infrarouge.

Nous avons choisi d'utiliser la cellule à effet de Peltier pour remplacer le dissipateur de chaleur présent sur le package d'Atom à partir des mesures qui ont montré que cette solution offrait des valeurs de température stables. Mais, nous pouvons aussi tracer le comportement du système étudié avec son dissipateur initial et faire une comparaison par rapport au refroidissement thermoélectrique pour valider notre choix.

RÉFÉRENCES

[1] Ehsan K Ardestani, F-J Mesa-Martinez, and Jose Renau. Cooling solutions for processor infrared thermography. In *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2010. SEMI-THERM 2010. 26th Annual IEEE*, pages 187–190. IEEE, 2010.

[2] Cratel Wichita blog. Ee senior design, 2014.

[3] Comsol. Thermal simuling of integrated circuits, October 2014.

[4] Farnoos Farrokhi Farkhani and Farah A Mohammadi. Temperature and power measurement of modern dual core processor by infrared thermography. In *Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on*, pages 1603–1606. IEEE, 2010.

[5] Michael S Floyd, Soraya Ghiasi, Tom W Keller, Karthick Rajamani, FL Rawson, Juan C Rubio, and Malcolm S Ware. System power management support in the ibm power6 microprocessor. *IBM Journal of Research and Development*, 51(6) :733–746, 2007.

[6] Tom's Hardware. Resource for hardware news and reviews, January 2014.

[7] Sunpyo Hong. *Modeling performance and power for energy-efficient GPGPU computing*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2012.

[8] Wei Huang, Kevin Skadron, Sudhanva Gurumurthi, Robert J Ribando, and Mircea R Stan. Differentiating the roles of ir measurement and simulation for power and temperature-aware design. In *Performance Analysis of Systems and Software, 2009. ISPASS 2009. IEEE International Symposium on*, pages 1–10. IEEE, 2009.

[9] ICTherm. Thermal modeling of integrated circuits, January 2014.

[10] Intel. Atom d2000 processorr datasheet, October 2014.

[11] Seda Ogrenci Memik, Rajarshi Mukherjee, Min Ni, and Jieyi Long. Optimizing thermal sensor allocation for microprocessors. *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, 27(3) :516–527, 2008.

[12] Carosena Meola. *Infrared Thermography : Recent Advances and Future Trends*. Bentham Science, 2012.

[13] Francisco J Mesa-Martinez, Michael Brown, Joseph Nayfach-Battilana, and Jose Renau. Measuring performance, power, and temperature from real processors. In *Proceedings of the 2007 workshop on Experimental computer science*, page 16. ACM, 2007.

[14] Francisco Javier Mesa-Martinez, Joseph Nayfach-Battilana, and Jose Renau. Power model validation through thermal measurements. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 35(2) :302–311, 2007.

[15] Edward J Nowak. Maintaining the benefits of cmos scaling when scaling bogs down. *IBM Journal of Research and Development*, 46(2.3) :169–180, 2002.

[16] Daniel Palomino, Muhammad Shafique, Hussam Amrouch, Altamiro Susin, and Jorg Henkel. hevcdtm : application-driven dynamic thermal management for high efficiency video coding. In *Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE), 2014*, pages 1–4. IEEE, 2014.

[17] Michiel AP Pertijs, Gerard CM Meijer, and Johan H Huijsing. Precision temperature measurement using cmos substrate pnp transistors. *Sensors Journal, IEEE*, 4(3) :294–300, 2004.

[18] Robert R. Schaller. Moore's law : Past, present, and future. *IEEE Spectrum*, 34(6) :52–59, June 1997.

[19] Kevin Skadron, Mircea R Stan, Wei Huang, Sivakumar Velusamy, Karthik Sankaranarayanan, and David Tarjan. Temperature-aware microarchitecture. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 31(2) :2–13, 2003.

[20] G Jeffrey Snyder, Marco Soto, Randy Alley, David Koester, and Bob Conner. Hot spot cooling using embedded thermoelectric coolers. In *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE*, pages 135–143. IEEE, 2006.

[21] Arvind Sridhar, Alessandro Vincenzi, Martino Ruggiero, Thomas Brunschwiler, and D Atienza. Compact transient thermal model for 3d ics with liquid cooling via enhanced heat transfer cavity geometries. In *Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 2010 16th International Workshop on*, pages 1–6. IEEE, 2010.

[22] John A. Stratton, Christopher Rodrigrues, I-Jui Sung, Nady Obeid, Liwen Chang, Geng Liu, and Wen-Mei W. Hwu. Parboil : A revised benchmark suite for scientific and commercial throughput computing. Technical Report IMPACT-12-01, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, March 2012.

[23] ThermaCam Reasercher 2.10 tools. Analysis software, October 2014.

[24] Rubén Usamentiaga, Pablo Venegas, Jon Guerediaga, Laura Vega, Julio Molleda, and Francisco G Bulnes. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7) :12305–12348, 2014.

[25] Arman Vassighi and Manoj Sachdev. *Thermal and power management of integrated circuits*. Springer, 2006.

[26] Michael Vollmer and Klaus-Peter Möllmann. *Infrared thermal imaging : fundamentals, research and applications*. John Wiley & Sons, 2010.

[27] N. Weste and D. Harris. *CMOS VLSI Design : A Circuits and Systems Perspective*. Addison Wesley, 2010.

[28] Satarou Yamaguchi, Shinji Fukuda, Hiroshi Kitagawa, Yoichi Okamoto, Tomohisa Kato, Hiroshi Nakatsugawa, et al. A new proposal of peltier cooling for microprocessor. In *International Conference on Thermoelectrics*. IEEE, 2008.

[29] George J Zissis and William L Wolfe. The infrared handbook. Technical report, DTIC Document, 1978.